LAS RAICES DEL CANCER • CEREBRO Y BOMBA CORAZON-PULMON

INVESTIGACION y CIENCIA

SEPTIEMBRE 2003
5,50 EURO

Edición española de
SCIENTIFIC AMERICAN

CIUDADES PERDIDAS DEL INDO

ASOCIACIONES GALACTICAS
MARES ESQUILMADOS
IDENTIDAD CUANTICA
ANTENAS ADAPTABLES





Edición española de
SCIENTIFIC AMERICAN

Septiembre de 2003

Número 324



DIRECTOR GENERAL José M.ª Valderas Gallardo
DIRECTORA FINANCIERA Pilar Bronchal Garfella
EDICIONES Juan Pedro Campos Gómez
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Bernat Peso Infante
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado
Olga Blanco Romero
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Telefax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
EXECUTIVE EDITOR Mariette DiChristina
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
NEWS EDITOR Philip M. Yam
SPECIAL PROJECTS EDITOR Gary Stix
REVIEWS EDITOR Michelle Press
SENIOR WRITER W. Wayt Gibbs
EDITORS Mark Alpert, Steven Ashley,
Graham P. Collins, Carol Ezzell,
Steve Mirsky y George Musser
PRODUCTION EDITOR Richard Hunt
VICE PRESIDENT AND MANAGING DIRECTOR, INTERNATIONAL
Dean Sanderson
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER
Gretchen G. Teichgraeber
CHAIRMAN Rolf Grisebach

DISTRIBUCION

para España:

LOGISTA, S. A.
Aragoneses, 18
(Pol. Ind. Alcobendas)
28108 Alcobendas (Madrid)
Tel. 914 843 900

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Teléfono 934 143 344

PUBLICIDAD

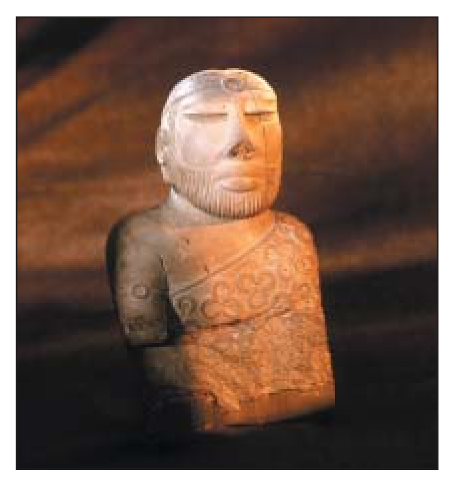
GM Publicidad
Edificio Eurobuilding
Juan Ramón Jiménez, 8, 1.ª planta
28036 Madrid
Tel. 912 776 400
Fax 914 097 046

Cataluña:
QUERALTO COMUNICACION
Julián Queraltó
Sant Antoni M.ª Claret, 281 4.º 3.ª
08041 Barcelona
Tel. y fax 933 524 532
Móvil 629 555 703

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

M.ª Rosa Zapatero Osorio: *Asociaciones galácticas*; Joandomènec Ros: *Mares esquilmados*; Esteban Santiago: *Las raíces del cáncer*; José Manuel García de la Mora: *Ciudades perdidas del Indo*; Cristóbal Pera: *Cerebro y bomba corazón-pulmón*; José Chabás: *Las esferas del mundo*; Ramón Pascual: *Identidad cuántica*; J. Vilardell: *Hace..., Curiosidades de la física* e *Ideas aplicadas*; Luis Bou: *Aventuras problemáticas*



Portada: Randy Olson/*Aurora Photos*

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
Fax 934 145 413

Precios de suscripción:

	Un año	Dos años
España	60,00 euro	110,00 euro
Extranjero	85,00 euro	160,00 euro

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 5,50 euro
Extraordinario: 6,00 euro

—El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Imprime Rotocayfo-Quebecor, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - 08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España



...cincuenta años

LA FUERZA DE LA NATURALEZA. «¿Qué mantiene unido al núcleo de un átomo? En el último cuarto de siglo, los físicos han dedicado a ese problema enormes esfuerzos, mentales y experimentales; han invertido en él probablemente más horas de trabajo que las empleadas en cualquier otra cuestión científica en toda la historia de la humanidad. Según las leyes de las fuerzas conocidas, las partículas de un núcleo atómico deberían separarse unas de otras, en vez de aferrarse entre sí tan fuertemente que sólo con máquinas de una energía extraordinaria podemos disgregarlas. El pegamento que mantiene unido al núcleo debe de ser una fuerza de un tipo absolutamente distinto de los que conocemos. El físico japonés Hideki Yukawa, ya en 1935, sugirió para el núcleo una nueva partícula, cuya emisión y absorción se supone que transmite las fuerzas nucleares. Esa partícula, cuando Yukawa la imaginó, era desde luego pura hipótesis. Hoy se la conoce como mesón. —Hans A. Bethe.»

STALIN Y LYSENKO. «Trofim D. Lysenko, quien desde 1948 regía la botánica soviética y era un símbolo de la ciencia marxista, parece haber perdido su trono con la muerte de Stalin. Se le ha denunciado en una revista de botánica rusa y en el órgano de la Academia de Ciencias Soviética. *Science* publicó hace poco una traducción de un notable documento del propio Lysenko, un panegírico de Stalin escrito para *Pravda.* En él, Lysenko atribuía el mérito a quien de verdad le correspondía. Stalin, revelaba, era el verdadero autor de las teorías de Lysenko: “El camarada Stalin hallaba tiempo incluso para examinar detalladamente los problemas más importantes de la biología... El mismo corrigió el esquema de mi artículo ‘Acerca del estado de la ciencia biológica’, y me aportó directrices precisas respecto a la redacción de ciertos pasajes.”»

...cien años

TATUAJES. «La palabra ‘tatuaje’ deriva del polinesio *tattau.* Fue el capitán Cook quien la incorporó al inglés. Maurice Berchon la define como sigue: ‘Una extraña y muy antigua costumbre consistente en introducir, bajo la epidermis cutánea, a distintas profundidades, una sustancia colorante, con el objeto de crear un dibujo que dure mucho tiempo’. En el Japón, el tatuaje suele restringirse a las clases más bajas, que se adornan con figuras del estilo de las que se ven en las porcelanas (*véase la ilustración*). Como pigmentos se usan cinabrio y tinta china.»



El arte del tatuaje: Japón, 1903

EL PLANEADOR WHITEHEAD. «No hace mucho, el señor Gustave Whitehead, de Bridgeport (Connecticut), que lleva estudiando más de quince años el vuelo mecánico, ha efectuado unos experimentos con un aeroplano [un planeador]. Para levantar el vuelo, el señor Whitehead corre con el aeroplano en contra del viento, precedido de un ayudante que tira del aparato con una cuerda cuando abandona el suelo. Actualmente, el señor Whitehead está construyendo un motor de 10 caballos de vapor. Cree que, utilizando aluminio lo más posible, su peso no excederá de 18 kilogramos. Lo empleará en un aeroplano mejorado. Espera elevarse verticalmente en aire en calma, moverse horizontalmente y descender otra vez verticalmente.» (*Nota de la redacción: No hay pruebas convincentes de que Whitehead construyera jamás un aeroplano motorizado capaz de volar.*)

...ciento cincuenta años

DEDICACIÓN. «La búsqueda de cosas nuevas y raras emprendida por el profesor Agassiz en los arrozales del sur ha sido coronada por el éxito. Eso sí, contrajo la fiebre maligna del país, de la cual ha escapado con vida de milagro. Entre las novedades que allí descubrió figura un pez sin aletas ventrales. Como muestra de su inextinguible entusiasmo por las cuestiones científicas se cuenta que, cuando ya se estaba recuperando poco a poco, un amigo lo visitó y le dijo: ‘Siento haberme enterado, profesor, de que ha estado usted gravemente enfermo’. ‘Ah, sí’, le contestó, ‘he estado muy enfermo pero no importa, he descubierto un pez sin ventrales’.»

EL AUGE DE LAS MÁQUINAS. «Creemos que en 1846 no había en este país ni un solo vestido cosido a máquina; en ese año se concedió la primera patente americana de una máquina de coser. Actualmente, ya son miles quienes visten trajes que las agujas mecánicas han cosido con una finura que compite con la de las muchachas de Cachemira. Las máquinas de coser no le han quitado el pan ni a una sola mujer de este país.»

CONTAMINACION
Lo que el viento trajo

Los aires de un lugar, contaba ya el autor hipocrático, pueden aliviar las enfermedades. o emponzoñar, según su naturaleza. La tesis persiste veinticinco siglos después, aunque con vestimenta molecular. Y se estudia su efecto, incluso el producido por los que vienen de lejos. Ginger Garrison, del Servicio de Inspección Geológica de los Estados Unidos, sospecha que el DDE, un producto de degradación del DDT que ataca la integridad del sistema endocrino, avanza, transportado por el polvo, desde Africa hacia el Caribe. En su laboratorio se han analizado muestras obtenidas entre Mali y el Caribe. Ella misma acudió a ese país africano, para identificar la fuente de esas sustancias químicas transportadas por el polvo. Su conclusión no invita a la tranquilidad. "A lo largo de los tres últimos lustros, afirma, se ha producido un aumento increíble en el uso de los plaguicidas y en la incineración de los plásticos".



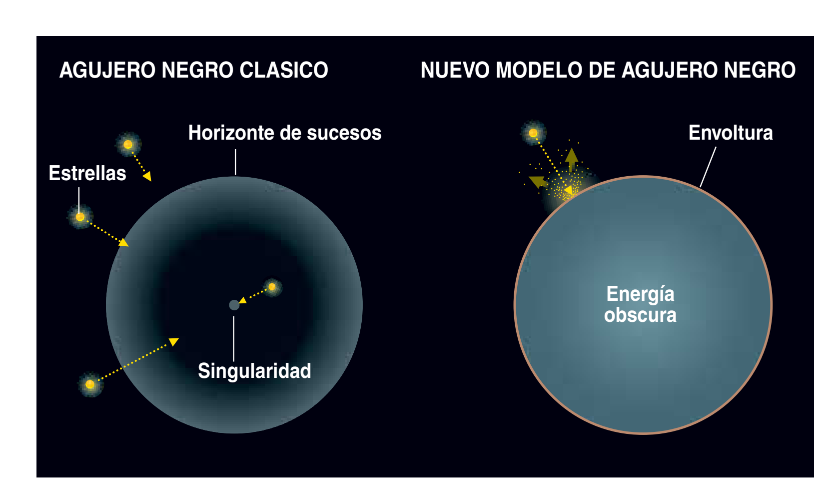
Esta tormenta de arena trae partículas en suspensión desde el desierto del Sáhara hasta las islas Canarias

PALEONTOLOGIA
Nuevo filón

No es infrecuente, de un tiempo a esta parte, que los paleontólogos busquen nuevos fósiles... en las vitrinas de los museos. Reconozcamos en su honor que en esa labor lo que desean es algo tan necesario y riguroso como la certificación de la identidad real de los especímenes. Pero en ocasiones se trata de auténticos descubrimientos. Hace una veintena de años se hallaron huesos fosilizados en Africa del Sur, que se dejaron abandonados en un armario de la Universidad australiana de Witwatersrand. Allí permanecieron hasta que los "ha desenterrado" Adam Yates. Tras estudiarlos, ha llegado a la conclusión de que definen una nueva especie de dinosaurio, *Antetonitrus ingenipes*. Medraba en las postrimerías del Triásico, hace unos 220 millones de años. Se trata del saurópodo más antiguo conocido. Herbívoro y cuadrúpedo, medía diez metros de longitud y pesaba dos toneladas.

ASTROFISICA
Agujeros negros

¿Qué sucedería si cayéramos en un agujero negro? Eso depende del teórico al que le formuláramos la pregunta. De acuerdo con la teoría general de la relatividad, nos deslizaríamos ingrávidos, aun cuando cruzásemos el horizonte de sucesos y nos adentráramos en su cono. Puesto que nos acompañaría en el viaje todo cuanto hubiera a nuestro alrededor, ni nos enteraríamos. Hasta más tarde, no sentiríamos los efectos de las fuerzas de marea, que convierten al agujero en estructura tan letal. Sólo quien estuviera observando nuestra fatal ventura desde la Tierra se daría cuenta de lo que estaría ocurriendo. Pero si nuestro interlocutor profesa la nueva teoría de los agujeros negros, la respuesta sería muy otra. Al llegar al horizonte de sucesos, nos veríamos rodeados con violencia por un material hiperdenso. Eso, si las partículas de nuestro organismo no se han desintegrado en rayos gamma.

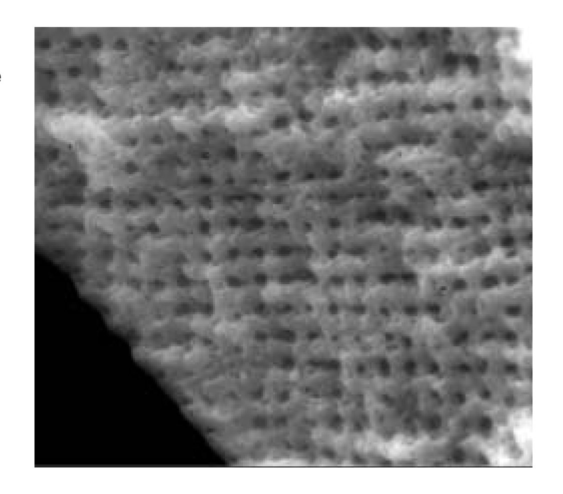


Dos modelos de agujero negro: el modelo clásico, a la izquierda, identifica el agujero negro con un punto de densidad infinita, que atrae hacia sí estrellas enteras, y un horizonte de sucesos, conocido éste por punto sin retorno. En cambio, el modelo que lo asocia a una bola de energía obscura proclama que la materia incidente se desintegra en la densa envoltura

ORBITAL IMAGING CORPORATION *Photo Researchers, Inc.* (*arriba*); SAMUEL VELASCO (*abajo*)

SEMICONDUCTORES
Cristales fotónicos

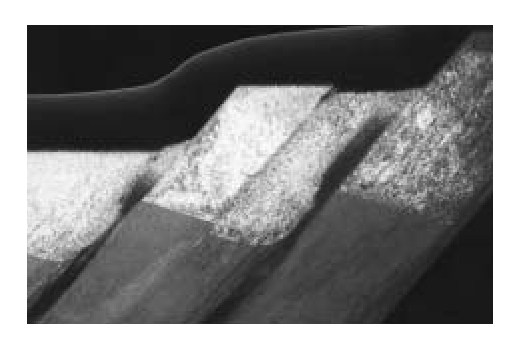
En las ondas de choque podría esconderse una nueva posibilidad de controlar las propiedades de los cristales fotónicos. Mediante simulaciones realizadas por ordenador, el equipo dirigido por John D. Joannopoulos, del Instituto de Tecnología de Massachusetts ha llegado a la conclusión de que tales ondas podrían ejercer un triple efecto portentoso sobre la luz. En virtud del primero, la luz quedaría atrapada en un frente de choque a lo largo de un tiempo controlable. En razón del segundo, la luz se catapultaría a una frecuencia muy superior, aun cuando se trate de un haz débil. Por último, podría estrecharse, en un orden de magnitud, la anchura de banda, hazaña ésta impensable en cualquier otro proceso no cuántico.



Red tridimensional de gotas de cristal líquido. Forma un cristal fotónico cuyas propiedades podemos controlar a través de la aplicación de un voltaje. Entre agujero y agujero media una separación de unos 0,25 micrometros

CIENCIA DE MATERIALES
Deformación plástica

Debemos a Takashi Saito una nueva teoría sobre deformación plástica que podría explicar sorprendentes propiedades de los metales con base de titanio. En la mayoría de los metales, el doblamiento o manipulación física de cualquier otra suerte produce el desplazamiento o dislocación de los átomos que conforman la estructura cristalina. Si la deformación persiste, las "arrugas" formadas se propagan por la red cristalina. La aplicación reiterada de la fuerza termina por crear una estructura enmarañada de granos microscópicos que tornan quebradiza la pieza. Los materiales ideados en el laboratorio de Toyota, dirigido por Saito, eluden tal reordenación atómica. Las aleaciones en cuestión responden con grietas planares, "fallas" las llaman ellos, entre láminas cristalinas. Porque, lo mismo que las placas tectónicas, se deslizan una a lo largo de la otra. Se trata de un fenómeno que absorbe energía y gracias al cual aumenta la flexibilidad del metal.



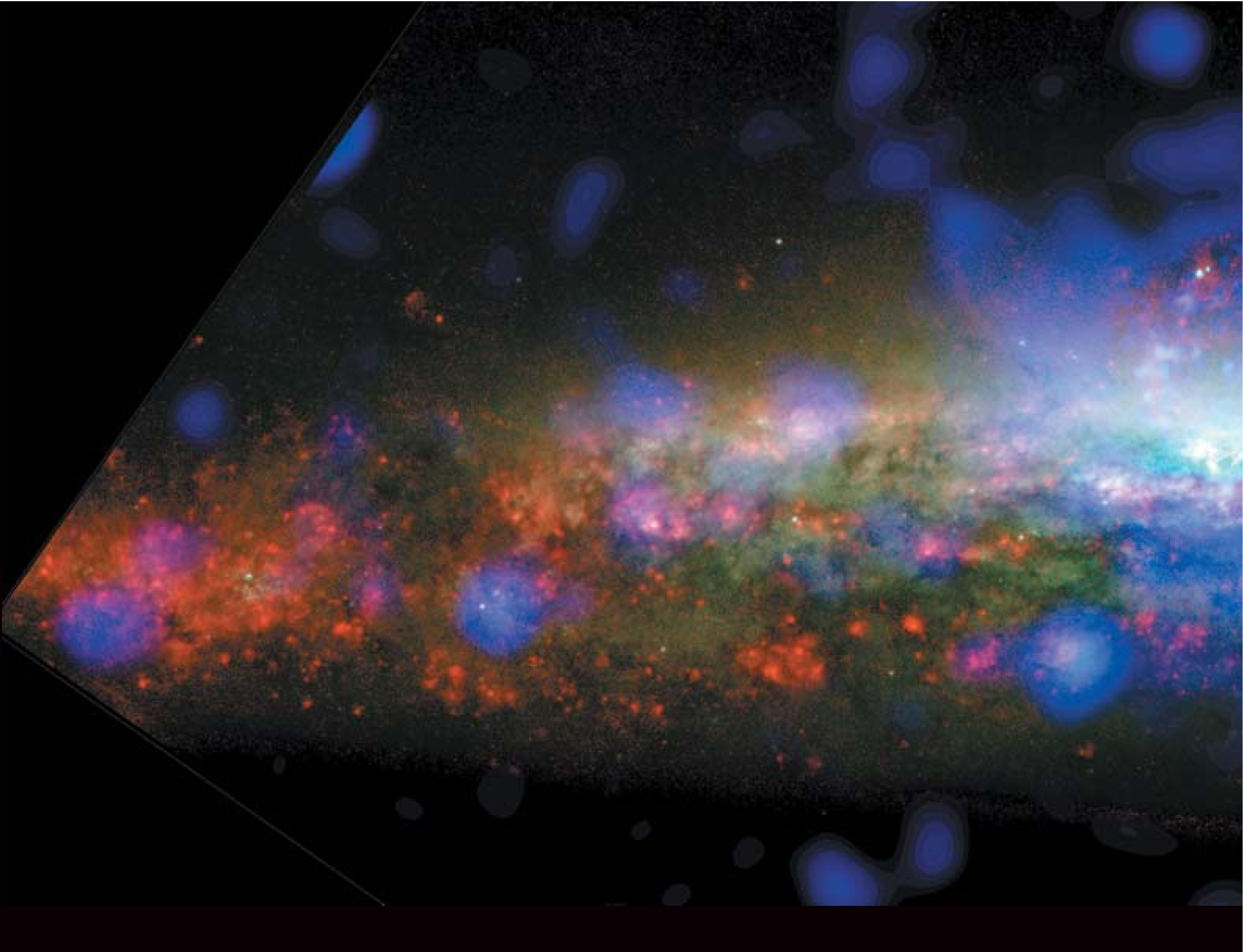
Placas microtectónicas deslizantes. De varios cientos de micrometros de espesor, explican el comportamiento de ciertas aleaciones de metales con base de titanio

METEOROLOGIA
Los rayos y las ciudades

Las tormentas eléctricas representan la naturaleza sublime. Sin embargo, un entorno artificial por excelencia, las grandes ciudades, favorece también la descarga de rayos. Al fin y al cabo, un entorno artificial no es más que naturaleza reordenada. En los veranos de 2000 a 2002, la red de vigilancia de rayos brasileña observó 310.000 rayos entre las nubes y el suelo en tres aglomeraciones urbanas del sudeste de Brasil. Su densidad por kilómetro cuadrado de territorio era entre un 60 % y 100 % mayor que en los alrededores. La distribución espacial de los relámpagos reproducía con claridad el perfil de la isla de calor de São Paulo. Se ratificaba así que, como se suponía, las diferencias de densidad de rayos guardan relación con las de calor. Igualmente, los datos de la Misión para la Medida de las Lluvias Tropicales, un satélite de la NASA y de la Agencia Espacial Japonesa, que muestran una mayor actividad eléctrica tormentosa sobre tierra firme que en el mar, se han interpretado como corroboración de esa hipótesis térmica. Ahora bien, aunque la mayoría de los rayos transmiten carga negativa, una fracción consiste en descargas positivas. En el estudio de Brasil esa parte era menor en un 7 % u 8 % sobre las ciudades que en los aledaños. Un fenómeno que no puede explicarse térmicamente. La disminución muestra una correlación positiva con la densidad de partículas en suspensión de menos de 10 micras. Por lo tanto, junto a la acción del calor hay que tener en cuenta la intervención de los aerosoles.



MICHAEL J. ESCUTI UNIVERSIDAD BROWN (*arriba*); CORTESIA DE LABORATORIOS CENTRALES DE INVESTIGACION Y DESARROLLO DE TOYOTA (*centro*); WARREN FAIDLEY (*abajo*)



Asociaciones

¿Por qué los agujeros negros gigantes
y los brotes de estrellas,
dos fenómenos que parecen tener muy poco en común,
van con frecuencia juntos?

Kimberly Weaver



1. LA GALAXIA NGC 3079 alberga dos de los fenómenos más poderosos del universo: un brote de formación estelar y un voraz agujero negro supermasivo. Como resultado, desde el centro de la galaxia se expulsa una burbuja de gas caliente en forma de cono a una velocidad de casi 1000 kilómetros por segundo. Esta imagen combina los datos de luz visible del telescopio espacial Hubble (*rojo y verde*) y los datos en rayos X del observatorio Chandra (*azul*).

galácticas

Los agujeros negros son las máquinas de destrucción más eficientes que se conocen. Su gravedad tan intensa es un billete de ida al olvido; dentro guardan lo desconocido, de donde nada regresa. Los vemos sólo porque la materia que se acumula a su alrededor se calienta, en su caída en espiral hacia el agujero, hasta alcanzar una temperatura de millones de grados, con el intenso brillo consiguiente. Parte de la energía cinética y del momento se transfieren a un chorro de partículas, que fluye hacia el exterior a velocidades próximas a la de la luz. Se atribuyen a agujeros negros de tamaños variados unas u otras de las erupciones de radiación y plasma que se observan por el cosmos.

NASA/CXC/GERALD CECIL UNIVERSIDAD DE CAROLINA DEL NORTE

Sin embargo, los agujeros negros no son todopoderosos. Incluso los del centro de muchas galaxias, los agujeros negros supermasivos, son insignificantes conforme a una vara de medir cósmica. Sólo contienen un pequeño porcentaje de la masa total de la galaxia y su gravedad está muy concentrada. Por ello, se pensaba que los agujeros supermasivos, no digamos ya los que no fuesen tan grandes, apenas ejercerían efecto alguno más allá de sus alrededores. La formación de estrellas en otros confines de la galaxia marcharía al son de una trompeta diferente.

Así, el descubrimiento, en los últimos diez años, de que la actividad de los agujeros negros y la formación estelar se hallan ligadas supuso una verdadera sorpresa. Muchas galaxias donde los agujeros negros absorben materia con avidez y generan un "núcleo de galaxia activa" (o AGN), conocen a la vez un "brote de formación estelar", es decir, un episodio de nacimiento de estrellas a ritmo muy vivo. ¿Cómo puede haber una ligazón entre dos procesos que parecen tan desligados?

Hoy día, la conexión entre los AGN y los brotes de formación estelar constituye un área revolucionaria de investigación. Las imágenes tomadas con el telescopio espacial Hubble identifican estos complejos fenómenos en los corazones de las galaxias, el observatorio Chandra de rayos X investiga regiones ocultas para el Hubble y los físicos teóricos intentan dar sentido a las observaciones. La investigación se centra en algunas de las preguntas básicas en astronomía: ¿cómo se encendieron en el oscuro universo primitivo miles de millones de estrellas? ¿Necesitaron los agujeros negros supermasivos alguna ayuda para crecer tanto? ¿Podrían ser agentes creadores, no sólo destructores?

Galaxias potenciadas

Las galaxias activas y los brotes de formación estelar se cuentan entre los fenómenos más espectaculares del universo. Un AGN es una fuente compacta y luminosa en el centro de una galaxia; los cuásares representan la variedad más extrema. Los AGN expiden tanta potencia como miles de millones, billones incluso, de soles: sobrepasan en brillo a sus propias galaxias. Los agujeros supermasivos, que se supone generan esa energía, almacenan de un millón a miles de millones de veces la masa solar dentro de una región que no llega ni a la milésima parte del diámetro del Sol. La materia que cae en espiral hacia el agujero se acelera y libera energía a medida que choca con otra materia en todas las longitudes de onda: de radio, infrarrojas, ópticas, ultravioletas, de rayos X y de rayos gamma.

El brillo de las galaxias con brotes de formación estelar puede compararse con el de los AGN. En ellas, el gas se condensa y produce estrellas a un ritmo de mil soles al año, mil veces más rápido que el de nacimiento de estrellas en nuestra galaxia. Algunos brotes abarcan sólo regiones pequeñas, de apenas unos cientos de años-luz, cercanas al centro de la galaxia; otros se extienden a mayor escala, a veces hasta cubrir decenas de miles de años-luz. Suceden con frecuencia en galaxias que sufren, o han sufrido hace poco, encuentros o fusiones con una galaxia vecina. Las fuerzas de marea entre las dos galaxias rompen el gas y lo precipitan hacia el interior; se acelera la contracción de las nubes que crea las estrellas. Un brote corriente dura unos diez millones de años; termina cuando ha agotado el gas.

Como los AGN, las galaxias con brotes brillan en un amplio intervalo de longitudes de onda. Gran parte de la energía que radian proviene de la luz de las estrellas recién formadas. Despiden también con intensidad radiación infrarroja, que se genera cuando el polvo interestelar absorbe y reemite la luz estelar, y rayos X, engendrados por las estrellas de masa grande, sobre todo a su muerte. Una estrella pesada acaba con una explosión de supernova, que genera rayos X directamente, dispersa restos calientes emisores, a su vez, de rayos X y deja tras de sí una estrella de neutrones o un agujero negro pequeño, que podrá absorber una estrella compañera y generar, también, rayos X. El gas interestelar circundante, calentado por la actividad estelar, también produce rayos X.

La idea de que los AGN tienen algún nexo con los brotes de formación estelar no surgió de un solo descubrimiento revolucionario, sino que se ha ido gestando poco a poco. Aunque ahora no hay nadie que no los asocie a un agujero negro supermasivo, no estaba tan claro hace apenas 15 años. Roberto Terlevich, de la Universidad de Cambridge, y Jorge Melnick, del Observatorio Europeo del Sur, sostenían que los AGN eran un tipo de brote de formación estelar. Con los telescopios de entonces, no cabía distinguir de un agujero negro supermasivo un nodo compacto de estrellas jóvenes y restos de supernovas.

Argumentos a favor del nexo

Esa hipótesis quedó arrumbada a finales del decenio de 1980, cuando las observaciones en distintas longitudes de ondas de telescopios de mayor resolución descubrieron la pequeñez de los AGN: apenas

Resumen/*AGN y brotes*

- Los dos fenómenos más energéticos en las galaxias son los núcleos galácticos activos (AGN) y los brotes de formación estelar. Los primeros son fuentes concentradas e intensas de luz; posiblemente, materia que está cayendo hacia un agujero negro supermasivo. Los cuásares constituyen el mejor ejemplo conocido de AGN. Los brotes son episodios de formación de estrellas a un ritmo rapidísimo.
- Se suponía que los AGN y los brotes, normalmente separados por vastas distancias, no tenían nada que ver entre sí. Pero ahora se sabe que se trata de dos fenómenos vinculados entre sí.
- ¿Es el AGN la causa del brote? ¿O viceversa? ¿Resultan de un tercer proceso ambos fenómenos? De la respuesta dependerá que se comprenda la evolución de las galaxias.

ANATOMIA DE UNA GALAXIA

UNA GALAXIA ESPIRAL TIPICA contiene cien mil millones de estrellas, la mayoría dispuestas en un disco plano. Hacia el centro hay un bulbo de estrellas; en el centro mismo se encuentra un agujero negro supermasivo. Cuando el agujero se alimenta, la materia que cae en su interior, forma un disco de acreción, o sale expulsada en chorro. Si la galaxia experimenta un brote de formación estelar, el gas se convierte en estrellas a un ritmo rápido. Los astrónomos pensaban que no había relación entre el agujero y los brotes. Se equivocaban.

DISCO GALACTICO
0,1 AÑOS-LUZ
AGUJERO NEGRO SUPERMASIVO
DISCO DE ACRECION
CHORRO
BULBO
REGION DEL BROTE
10.000 AÑOS-LUZ

DON DIXON

si miden unos años-luz, y probablemente no pasen de unos minutos-luz; demasiado poco para albergar un brote de formación estelar. Aun cuando un cúmulo entero de estrellas cupiera dentro de un espacio tan reducido, las estrellas se fusionarían entre sí y acabarían por crear un agujero negro. Es más, los AGN suelen ir acompañados por chorros de material expelido a alta velocidad; como un agujero negro, pero no como un brote estelar [*véase* "Agujeros negros en los centros galácticos", por Martin J. Rees; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, enero de 1991].

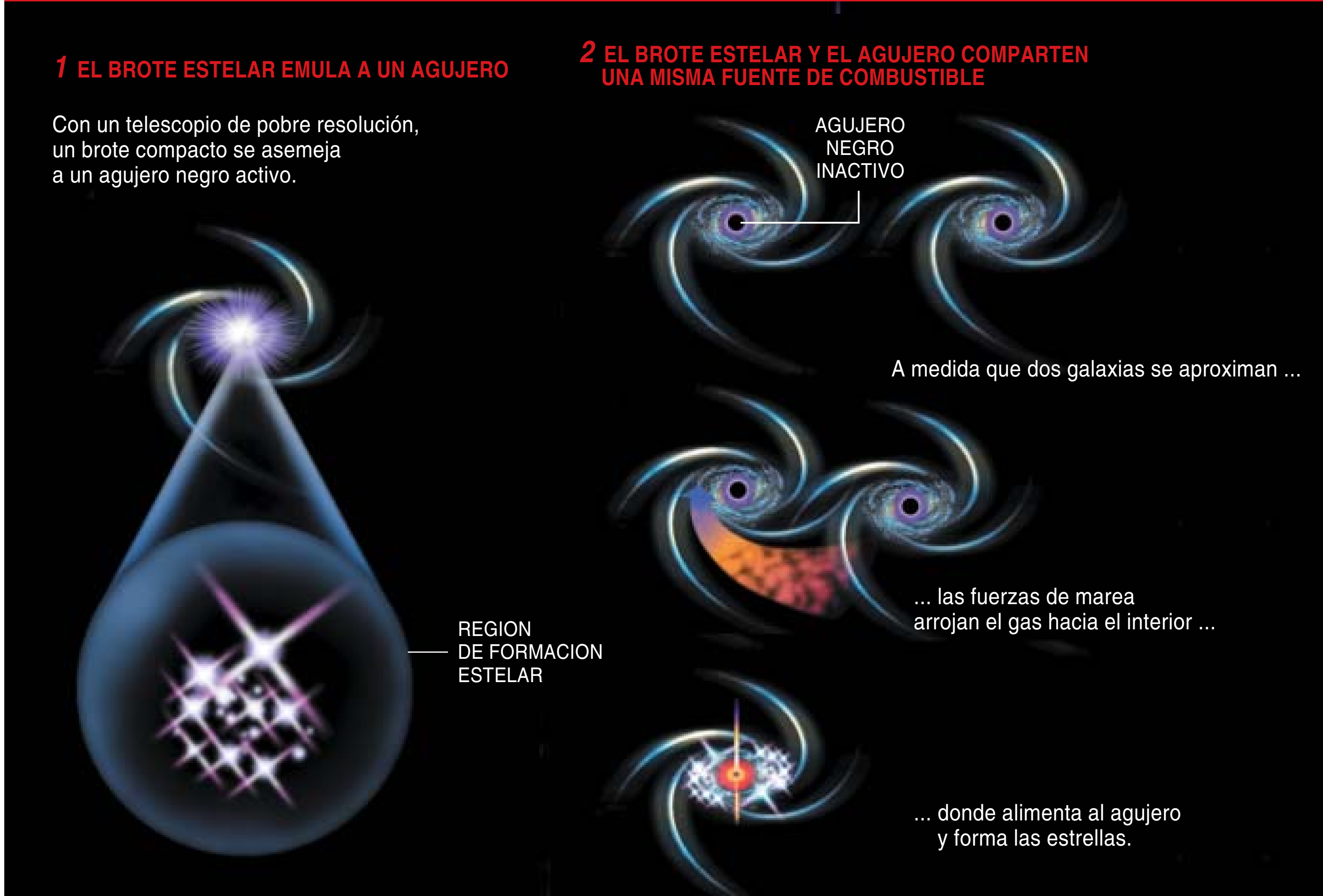
Aunque los AGN y los brotes de formación estelar eran, pues, fenómenos diferentes, el debate condujo a que se aceptara que alguna relación tenía que haber entre ellos [*véase* "Explosiones galácticas", por Sylvain Veilleus, Gerald Cecil y Jonathan Bland-Hawthorn; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, abril de 1996]. Son muchas las pruebas observacionales que ahora apuntan a un nexo que los una. La variedad de los descubrimientos era extraordinaria: las consecuencias de la conexión se veían por todo el universo.

La primera prueba es la más directa. En galaxias cercanas, los telescopios han descubierto AGN simultáneos a brotes de formación estelar. No ha sido una tarea fácil: los núcleos galácticos, repletos de gas y polvo, obstruyen nuestra visión. Aquí desempeña una función importante la astronomía de rayos X. Penetran éstos en el gas denso. Incluso aunque los telescopios que los captan carecen de la resolución del Hubble, con frecuencia ofrecen imágenes más nítidas del centro de las galaxias.

Una segunda prueba viene dada por la reciente catalogación de unas 23.000 AGN por el equipo de Timothy Heckman, de la Universidad Johns Hopkins. Deducen la existencia de los AGN o de los brotes, no de la criba minuciosa de las imágenes de todas las galaxias, sino de la intensidad de ciertas líneas espectrales: la presencia de oxígeno muy ionizado indica la existencia de un AGN; una fuerte absorción de la luz por el hidrógeno, la de un brote. La conclusión principal de este trabajo fue que las galaxias con AGN muy poderosos tienen más estrellas jóvenes que las galaxias similares sin AGN. Cuanto más potente sea el AGN, más probable será que la galaxia haya pasado poco antes por un intenso brote de formación. En resumen, esta investigación probó que la conexión entre los brotes y los AGN no era accidental.

Tercero, las galaxias con AGN no son las únicas con agujeros negros supermasivos. Los astrónomos también han detectado este tipo de agujeros en los centros de galaxias inactivas. Por lo que parece, hay agujeros gigantes por todas partes. La mayor parte del tiempo permanecen dormidos e invisibles; sólo producen AGN cuando cae hacia ellos materia a un ritmo vivo y constante. John Kormendy, de la Universidad de Texas en Austin, Douglas O. Richstone, de la

CUATRO MANERAS DE RELACIONAR AGUJEROS NEGROS Y BROTES ESTELARES

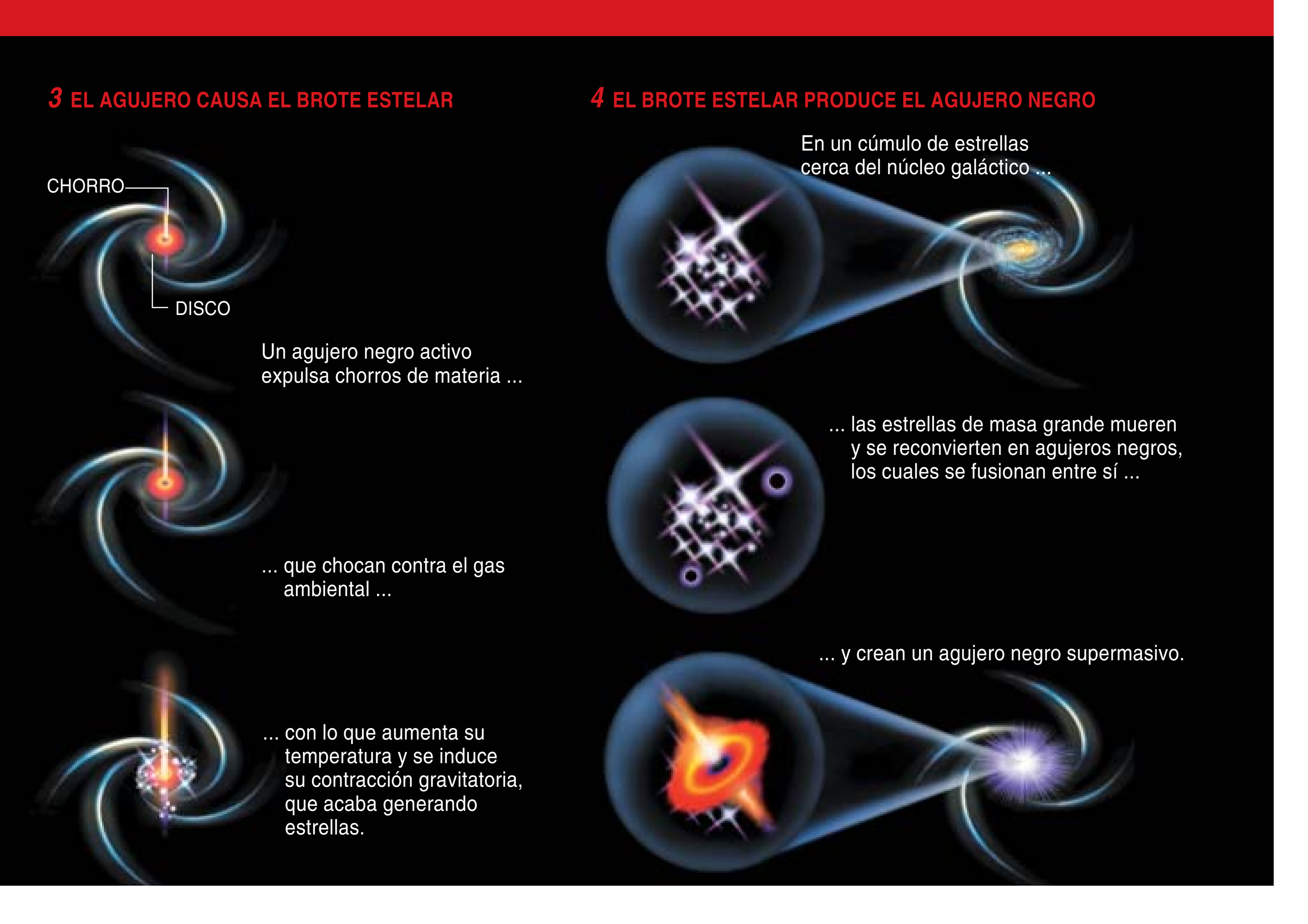


Universidad de Michigan en Ann Arbor, y otros han demostrado que existe una correlación entre la masa de estos agujeros y la masa total de las estrellas de los centros galácticos: aquélla es alrededor de un 0,1 por ciento de ésta. La misma correlación vale para la mayoría de las galaxias con un AGN (pero no para todas). Algún tipo de proceso, pues, liga los agujeros negros centrales y la formación estelar. Tenaces discrepancias entre los autores dan fe de que no acaba de entenderse tal relación.

La conexión entre los AGN y los brotes tiene efectos incluso a sólo 24.000 años-luz de nosotros, en el corazón de la Vía Láctea. Los movimientos rápidos de las estrellas y del gas alrededor del centro galáctico son la prueba de la presencia de una masa concentrada igual a 2,6 millones de soles. Las emisiones en radio y en rayos X procedentes del centro señalan que se trata de un agujero negro supermasivo; no un agujero activo, sino uno que se alimenta ocasionalmente. Algunos defienden que actúa como un AGN en miniatura, que devora material a un ritmo diez millones de veces inferior al de un AGN normal. Aunque no le acompaña un brote de formación estelar, existen varios cúmulos brillantes de estrellas en sus proximidades. Podrían ser los restos de brotes de hace varios millones de años.

Al mirar hacia atrás en el tiempo se encuentran dos pruebas más. Se ha visto que el lazo entre los AGN y la formación estelar era aún más fuerte cuando el universo tenía una décima parte de su edad actual. En aquel entonces eran más comunes dos tipos de galaxias: las galaxias infrarrojas ultraluminosas y las radiogalaxias, que pueden ser galaxias en un estado temprano de formación o galaxias en proceso de fusión. Los núcleos contenían cantidades ingentes —miles de millones de masas solares— de gas denso y frío; cobijaban AGN y brotes. La otra línea de investigación del pasado involucra a los AGN más distantes y luminosos: los cuásares. Con frecuencia, residían en galaxias informes, cuyas estructuras distorsionadas y colores inusuales sugieren que estaban en trance de fusionarse entre sí y creaban estrellas a un ritmo alto.

Una línea final de prueba deriva del estudio de la radiación del fondo cósmico en rayos X, menos conocida que el fondo cósmico de microondas. Ha revelado que existe una población de AGN oculta a los telescopios ópticos; contamos con una explicación natural: los AGN estuvieron acompañados de brotes de formación estelar que inundaron sus galaxias de polvo [*véase* “Inventario cósmico”, por Günther Hasinger y Roberto Gilli; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, mayo 2002].



¿La gallina o el huevo?

La conexión entre los AGN y los brotes de formación estelar puede explicarse de cuatro maneras: que no sean sino un mismo fenómeno; que un tercer proceso dé lugar al AGN y al brote; que el AGN produzca el brote; o que el brote cree el AGN.

La primera posibilidad no es más que una versión restringida de la vieja idea que identifica los AGN con un tipo de brote estelar, errónea para la mayoría de los AGN, pero quizá correcta en algunos casos. Los AGN débiles podrían deberse, más que a un agujero negro supermasivo, a una actividad estelar extrema encerrada en una región tan pequeña, que los telescopios la confundiesen con un agujero. Esta posibilidad sigue abierta.

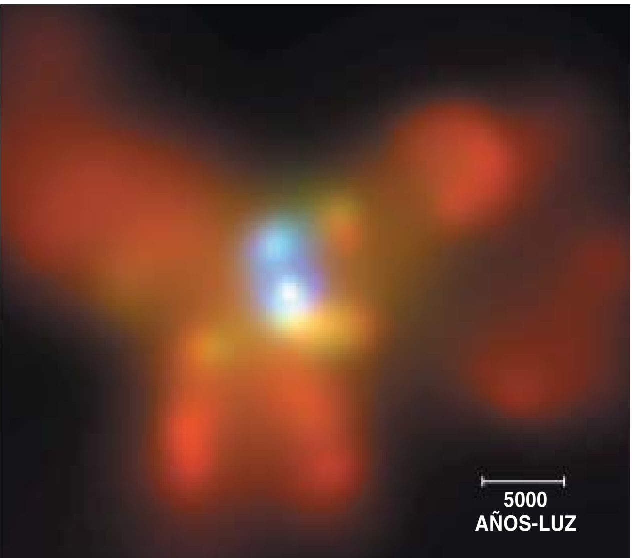
La autora

KIMBERLY WEAVER investiga en el Laboratorio de Astrofísica de Altas Energías del Centro Goddard de la NASA. Docente en la Universidad de Johns Hopkins, estudia las emisiones de rayos X de agujeros negros, núcleos de galaxias activas y galaxias con brotes de formación estelar.

Según la segunda hipótesis, la "conexión" es una simple coincidencia. Por ejemplo, una fusión de una galaxia con otra podría impeler el gas hacia el centro de la estructura recién constituida, lo que induciría el brote estelar y desencadenaría el AGN al facilitarle combustible. Esta teoría predice que el tiempo necesario para que un agujero negro crezca hasta proporciones supermasivas (unos 10 millones de años) es similar a la vida media típica de un brote de formación de estrellas, y también al tiempo que les lleva a dos galaxias fusionarse.

La mayoría de los investigadores, no obstante, se han decantado por las otras dos posibilidades, en las que los AGN y los brotes mantienen una relación causal. La tercera hipótesis sostiene que un agujero negro supermasivo ya existente ejerce, en contra de lo esperado, una fuerte influencia en la galaxia anfitriona. Quizás atraiga materia hacia el centro galáctico y desencadene así la formación de estrellas. Françoise Combes, del Observatorio Astronómico de París, es la adalid de este modelo. En su opinión, una vez se ha constituido el agujero, el gas fluye de modo natural hacia el núcleo de la galaxia y alimenta el AGN. La acumulación del gas va proporcionando el material bruto del brote estelar. Se trata de una tesis verosímil: muchas de las galaxias cercanas que cobijan AGN





2. PROBLEMA DOBLE: tal y como sugiere su curiosa forma de mariposa (*arriba*), NGC 6240 no es una, sino un par de galaxias que se fusionaron entre sí en fecha reciente. El sistema parece tener no sólo un agujero negro, sino dos agujeros negros supermasivos, que se manifiestan como un par de nítidas fuentes de rayos X (*círculos azules en la imagen de abajo*). El gas difuso emisor de rayos X (*rojo*) constituye un signo de formación estelar rápida. NGC 6240 presenta un ejemplo clásico de la simultaneidad de los agujeros, los brotes estelares y la fusión de galaxias.

NASA/ROELAND P. VAN DER MAREL Y JORIS GERSSEN *Instituto Científico del Telescopio Espacial (imagen óptica)*, NASA/CXC/STEFANIE KOMASSA *Instituto Max Planck de Física Extraterrestre (imagen de rayos X)*

contienen también estructuras ricas en polvo dentro de sus núcleos; podría ser material traído desde fuera. Por otra parte, no todas estas estructuras tienen la forma predicha por la teoría.

Pero los brotes podrían ser una consecuencia, no de la caída de materia hacia el agujero, sino de flujos de energía que partiesen del agujero. Cuando el agujero negro supermasivo empezase a tragar materia y se produjera el AGN, las ondas de choque y los chorros que generaría sacudirían la galaxia. Al apilarse el gas a lo largo de los frentes de choque se formarían estrellas. Las observaciones de la galaxia Centaurus A, donde el ritmo de formación estelar es muy alto, parecen señalar que allí ocurrió una explosión masiva de tipo AGN hará unos 10 millones de años. En los bordes de la galaxia se aprecia, desde el Chandra, un anillo de emisión en rayos X con un diámetro de unos 25.000 años-luz; quizá sea el resultado de los frentes de onda de la explosión. Esta habría coincidido con un episodio de formación estelar; el anillo de rayos X se solapa con arcos de estrellas muy jóvenes.

De esa hipótesis sobre la precedencia del agujero negro se extraen unas conjeturas interesantes. Quizá fuesen los agujeros negros, y no las estrellas, los primeros faros en la completa oscuridad del universo primitivo. Es más, algunos han conjeturado que el Sol nació durante un brote estelar. Si el origen de éste partió de un AGN de la Vía Láctea, le debemos nuestra existencia a un agujero negro.

El nacimiento de un agujero

La hipótesis de la precedencia del brote estelar, sin embargo, cuenta con mayor apoyo teórico y empírico. La conexión resulta natural desde el punto de vista de la evolución estelar ordinaria. Un brote crea cúmulos densos de estrellas, dentro de los cuales abundan las colisiones estelares [*véase* “Colisiones estelares”, por Michael Shara; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, enero 2003]. Las estrellas grandes del cúmulo mueren enseguida y se convierten en estrellas de neutrones o en agujeros negros de masa estelar. Con el tiempo, estos objetos se agrupan y van construyendo, en el curso de decenas o cientos de millones de años, un agujero negro de masa creciente.

O bien, un gran agujero negro podría nacer de estrellas poco pesadas, similares a nuestro Sol. Por lo normal, los astros de ese tamaño no se convierten en agujeros, pero en un cúmulo muy denso se irán fusionando entre sí hasta crear megaestrellas con masas de cientos a miles de veces la de nuestro Sol. Estas megaestrellas se derrumbarán sobre sí mismas y producirán agujeros negros de masas similares. El proceso requiere unos 100 millones de años, lapso mucho menor que la vida media de una galaxia y lo suficientemente rápido como para explicar los primeros cuásares.

Sin importar cuál sea su origen, los agujeros negros tenderán a desplazarse hacia el centro de la galaxia. Varios de ellos podrían fusionarse allí y formar un agujero negro supermasivo. Refuerzan esta idea las observaciones de la galaxia NGC 6240, donde dos agujeros negros supermasivos giran uno alrededor del otro; su destino es fusionarse (*véase la figura 2*). Los agujeros supermasivos continúan creciendo al alimentarse del material de los alrededores. Incluso los cúmulos de estrellas que se forman en otros confines de la galaxia pueden proporcionar materia al agujero central. Poco a poco pierden energía cinética y momento angular, debido a la fricción a escala galáctica, es decir, a las interacciones gravitatorias y dinámicas con



3. ¿UNA PRUEBA IRREBATIBLE? La región central de la galaxia NGC 253 (*izquierda*) da a entender que los brotes de formación estelar pueden crear agujeros negros supermasivos. Hay tres fuentes de rayos X (*círculos de la imagen de la derecha*) más brillantes que los agujeros negros de masa estelar, pero más débiles que los agujeros supermasivos. Quizá se trate de agujeros negros de tamaño mediano, un paso intermedio en la generación de grandes agujeros a partir de estrellas muertas. La borrosidad de la imagen de rayos X se debe al gas asociado a la formación estelar.

NASA/SAO/CXC (*imagen de rayos X*); EUROPEAN SOUTHERN OBSERVATORY (*imagen óptica*)

el resto de la galaxia. Los cúmulos caen en espiral hacia el interior; con el tiempo, las fuerzas de marea los descompondrán. En el transcurso de miles de millones de años, este proceso inyecta hacia el agujero negro central una masa equivalente a decenas de millones de soles. Otras perturbaciones del disco galáctico —interacciones, fusiones— también proporcionan combustible al agujero negro.

Pesos medios

Según el modelo de la precedencia del brote, ha de existir una nueva población de agujeros negros, de un tipo intermedio entre los agujeros negros de masa estelar y los supermasivos. Durante los últimos 10 años, se han ido reuniendo pruebas circunstanciales, en forma de fuentes ultraluminosas en rayos X, que parecen ratificar esa predicción. Estas fuentes, encontradas en varias galaxias cercanas, emiten entre diez y varios cientos de veces más energía en rayos X que las estrellas de neutrones o los agujeros negros de masa estelar. Podría tratarse de estrellas de neutrones cuya luz se dirige directamente hacia nosotros, lo que les prestaría un brillo aparente anómalo. Pero cada vez hay más indicios de que nos hallamos ante agujeros negros con masas que multiplican cientos de veces la del Sol.

El año pasado, los equipos de Roeland P. van der Marel, del Instituto de Ciencias del Telescopio Espacial, en Baltimore, y Michael Rich, de la Universidad de California en Los Angeles, encontraron indicios de agujeros de masa intermedia en los centros de dos cúmulos densos de estrellas, M15 y M31-G1. Las estrellas de estos cúmulos se mueven tan rápido, que entre ellas ha de haber un cuerpo de 2000 y de 20.000 masas solares, respectivamente, para que no se dispersen. No tiene por qué ser un agujero negro grande: produciría el mismo efecto un grupo de estrellas de neutrones o de agujeros negros pequeños. Pero incluso aunque se tratase de esto segundo, con el tiempo los objetos acabarán chocando y producirán un enorme agujero negro.

Tod Strohmayer y Richard Mushotzky, del Centro Goddard de la NASA, han observado que una de las fuentes ultraluminosas cercanas al centro de la galaxia M82, una galaxia con brotes, parpadea con un período de unos 18 segundos. Es un parpadeo demasiado lento e irregular para provenir de la superficie de una estrella de neutrones, y demasiado intenso para que lo genere la materia en órbita alrededor de una estrella de este tipo. Si parpadea la materia que rodea a un agujero negro, éste habría de tener una masa de varios miles de soles. En la galaxia espiral NGC 1313 ha encontrado Jon Miller, del Centro Smithsoniano de Astrofísica de Harvard, dos fuentes ultraluminosas en rayos X más frías que los agujeros negros de masas estelares. La teoría predice que, cerca de los agujeros negros, las temperaturas decrecen cuanto mayores sean sus masas, por lo que los agujeros de NGC 1313 deben ser más pesados que los de masa estelar.

Estos posibles agujeros de masa intermedia no se encuentran en el centro de sus respectivas galaxias anfitrionas; se ignora qué importancia puedan tener para la relación entre los AGN y los brotes de formación estelar. Pero mi investigación de una galaxia cercana

con brotes, NGC 253, ha aportado algunos elementos de juicio directos. Antes de 1995, los astrónomos pensaban que los intensos rayos X procedentes de esta galaxia se originaban en el gas caliente asociado a los brotes. Ese año, descubrí en el espectro de rayos X indicios de la presencia de agujeros negros. Hasta 2001 no conseguiríamos, mis colaboradores y yo, una imagen en rayos X de esta galaxia, tomada con el observatorio Chandra (*véase la figura 3*).

Encontramos cinco fuentes superluminosas en rayos X en una región interior de NGC 253 de unos 3000 años-luz de tamaño. Una de ellas, situada en el propio centro de la galaxia, es unas cien veces más brillante que cualquier estrella de neutrones o agujero de masa estelar: su masa ha de equivaler a un centenar de soles. Podría ser un agujero negro captado en el momento de convertirse en un AGN maduro. Habría sucedido como sigue: se produce un brote cerca del centro de la galaxia; las estrellas de mayor masa colapsan gravitatoriamente y se fusionan entre sí creando agujeros negros de peso medio, que caen en espiral hacia el centro galáctico, donde, a su vez, se fusionan entre sí y crean la semilla de un agujero supermasivo; cuando el brote va apagándose, el agujero supermasivo empieza su actividad como AGN.

El estudio de la intervención de los brotes estelares en el aprovisionamiento y crecimiento de los agujeros negros supermasivos es fundamental para entender el nacimiento de los más poderosos AGN, los cuásares. Los astrónomos han estado preguntándose por qué los cuásares del universo temprano eran más energéticos que los de hoy día. La razón podría ser que por entonces abundaban más los episodios de formación estelar, que encenderían AGN más intensos.

Quizá no haya una precedencia inequívoca. Puede que las galaxias experimenten ciclos, con fases dominadas por AGN y fases dominadas por brotes. Cuando los ciclos se solapan, se observan los dos fenómenos a la vez. Cabe dentro de lo posible que los AGN y los brotes evolucionen al unísono. Las observaciones actuales no alcanzan a distinguir si los AGN son primero, o si los brotes vienen antes, o si ocurren unos y otros a la vez. Tendrá que resolver este fascinante problema la próxima generación de telescopios.

Las observaciones de SIRTF, telescopio infrarrojo espacial de la NASA, proporcionarán una información valiosa para el estudio de la conexión entre los AGN y los brotes de formación estelar en las galaxias primitivas. Se compararán los datos en el visible, el infrarrojo y los rayos X para analizar si durante las etapas de formación galáctica dominan los AGN o los brotes; contribuirán a determinar qué fue primero. Es también muy importante encontrar más galaxias cercanas parecidas a NGC 253.

Puede que la relación entre AGN y brotes sea el último nexo intergeneracional del universo. Los agujeros negros representan los restos aglutinados de estrellas extintas; los brotes de formación estelar, el nacimiento de estrellas enérgicas. Quizá la colaboración de lo viejo y lo nuevo conformó las galaxias, y entre ellas, la nuestra.

Bibliografía complementaria

RELATIONSHIPS BETWEEN ACTIVE GALACTIC NUCLEI AND STARBURST GALAXIES. Dirigido por Alexei V. Filippenko. ASP Conference Series, vol. 31; 1992.

STARBURST GALAXIES: NEAR AND FAR. Dirigido por Linda Tacconi y Dieter Lutz. Springer Verlag, 2001.

X-RAY PROPERTIES OF THE CENTRAL KPC OF AGN AND STARBURSTS: THE LATEST NEWS FROM CHANDRA. Kimberly A. Weaver, en *The Central Kiloparsec of Starbursts and AGN: The La Palma Connection*. Dirigido por J. H. Knapen, J. E. Beckman, I. Shlosman y T. J. Mahoney. ASP Conference Series, vol. 249; 2001.

STARBURST-AGN CONNECTION FROM HIGH REDSHIFT TO THE PRESENT DAY. Yoshiaki Taniguchi, en *Proceedings of the IAU 8th Asian-Pacific Regional Meeting*, vol. 1. Dirigido por Satory Ikeuchi, John Hearnshaw y Tomoyuki Hanawa. ASP Conference Series, vol. 289; 2003.

MARES ES



QUILMADOS

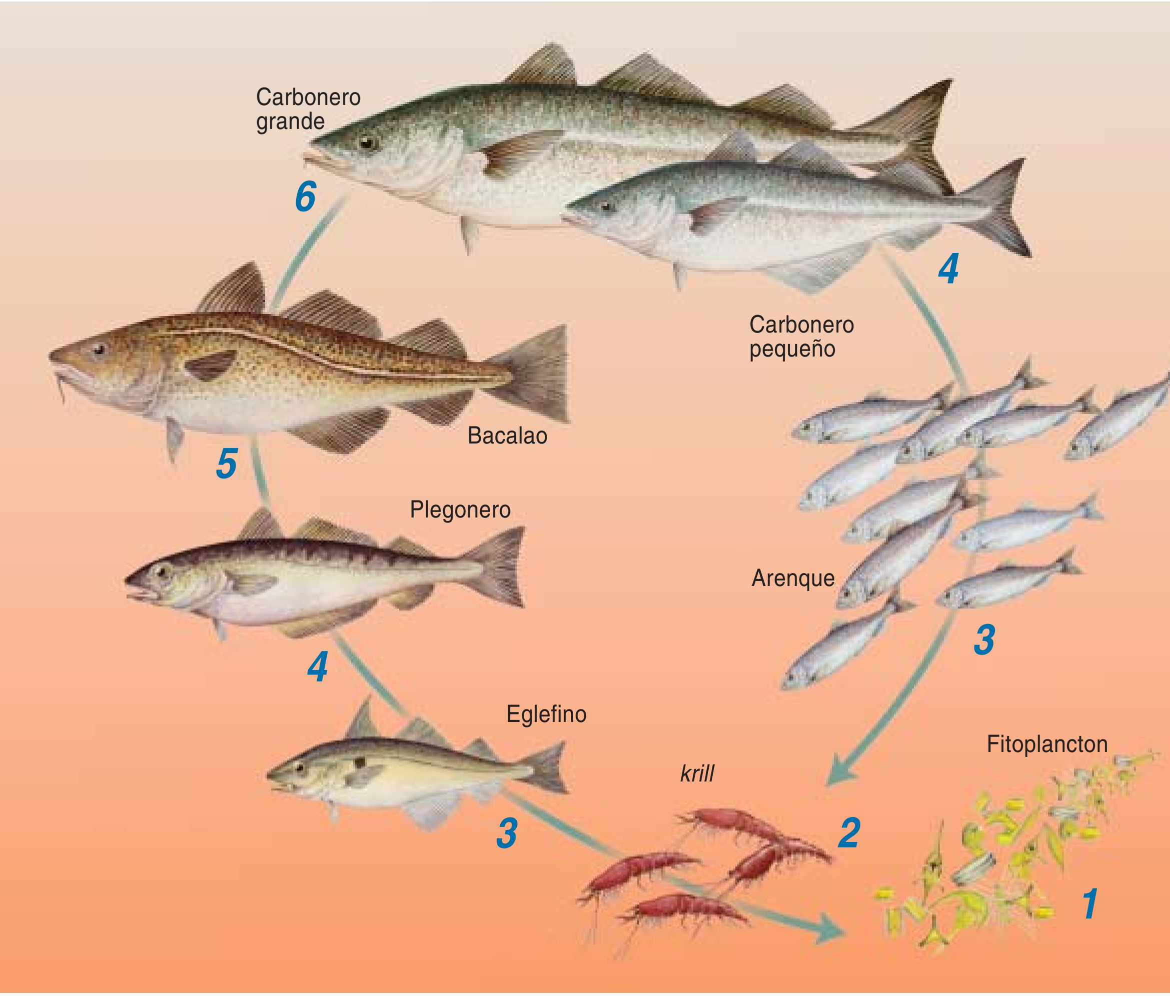


JEAN GAUMY *Magnum*

La sobrepesca ha reducido radicalmente las poblaciones de peces, en particular las de las grandes especies depredadoras, hasta un mínimo nunca visto

Daniel Pauly y Reg Watson

El banco Georges (el retazo de océano, un tanto somero, que se encuentra frente a las costas de Nueva Escocia) rebosaba antaño de peces. Textos del siglo XVII cuentan que enormes cardúmenes de bacalao, salmón, lubina estriada (*Morone saxatilis*) y esturión rodeaban las barcas. Hoy en día, las cosas son muy distintas. Barcos arrastreros que remolcan redes de arrastre del tamaño de campos de fútbol han esquilmado el fondo; con la pesca de cada día, se llevan además ecosistemas enteros y sustratos de mantenimiento, como las esponjas. Más arriba, en la columna de agua, palangres y redes de deriva pescan los últimos tiburones, peces espada y atunes. Las capturas de estas especies comerciales se están reduciendo, y el tamaño de los peces que se extraen es cada vez menor; un gran número son pescados antes incluso de que hayan tenido tiempo de madurar. El fenómeno no se restringe al Atlántico Norte, sino que afecta a todo el globo.



Pescar cada vez más abajo de la red trófica: un ejemplo

Las redes tróficas contienen menos pasos, o niveles tróficos, cuando ocurre la sobrepesca. Después de que se hayan capturado a los miembros mayores de una especie depredadora de crecimiento lento (como el carbonero o merlán negro, *Pollachius virens*), los pescadores han de dedicarse a los individuos más pequeños, que todavía no han alcanzado el tamaño pleno. A diferencia de los carboneros maduros, estos peces juveniles no son lo bastante grandes para cazar bacalaos (*Gadus morhua*), que normalmente consumen plegoneros (*Merlangius merlangus*), que a su vez suelen comer eglefinos (*Melanogrammus aeglefinus*), que son consumidores de *krill* (*izquierda*). Por el contrario, los jóvenes carboneros han de comer peces más pequeños todavía, como los arenques (*Clupea harengus*), que se alimentan de *krill* (*derecha*). Por lo tanto, eliminar a los grandes carboneros reduce la red trófica a cuatro niveles en lugar de seis, lo que altera los ecosistemas. Adviértase que los niveles tróficos reales raramente llegan a seis, porque los peces grandes comen peces muy diversos.

Muchos tienen la impresión equivocada de que la contaminación es la causa de que se diezmen las especies marinas. A otros les costará creer que exista siquiera escasez, porque todavía ven que las pescaderías rebosan de merluzas negras, bacalaos antárticos (*Dissostichus eleginoides*) y filetes de atún. ¿Por qué razón se considera que la pesca comercial apenas si afecta a las especies capturadas? Sospechamos que esta percepción es una reliquia de otra época, cuando la pesca consistía en una ardua lucha por arrancar de un mar hostil el sustento con barcas minúsculas y artes elementales.

Nuestros estudios recientes demuestran que ya no podemos seguir viendo el mar como un proveedor generoso cuyas profundidades misteriosas contienen recursos inagotables. Durante los últimos años hemos acumulado y analizado datos sobre las pesquerías mundiales. Hemos compilado así el primer análisis general del estado de los recursos alimentarios marinos. Sabemos ahora que algunos países, en particular China, han hinchado los informes de sus capturas, lo que ha enmascarado una tendencia a la baja en las capturas de pescado de todo el mundo. Los pescadores, a fin de alcanzar las cantidades capturadas en el pasado e intentar satisfacer la demanda creciente de pescado, han de faenar en aguas cada vez más alejadas de la costa y a profundidades cada vez mayores. Afirmamos que la sobrepesca, y la mera pesca, de estas poblaciones distantes son prácticas insostenibles que están causando la reducción numérica de especies importantes. Pero no es todavía demasiado tarde para poner en práctica políticas que protejan las pesquerías mundiales para las generaciones futuras.

Resumen/*Reducción de las pesquerías*

- Nuevos análisis demuestran que las pesquerías corren peligro de desplomarse debido a la sobrepesca, pero muchos todavía consideran que el océano es un recurso ilimitado cuyas riquezas la humanidad apenas ha empezado a extraer.
- La sobrepesca es el resultado de la explosión demográfica humana, del aumento de la demanda de pescado como alimento, de las mejoras en las técnicas y de las políticas mundiales y nacionales que no consiguen promover la gestión sostenible de las pesquerías.
- Las soluciones al problema incluyen la prohibición de las artes que, como las redes de arrastre, dañan los ecosistemas; el establecimiento de reservas que permitan la recuperación de las pesquerías, y la eliminación de los subsidios gubernamentales que mantienen un número excesivo de barcos en el mar que capturan una cantidad demasiado pequeña de peces.

La Ley del Mar

Para explicar de qué manera el mar ha llegado a su situación actual hay que recordar algunos datos del pasado. El océano era antaño libre para todos. Las

CLEO VILETT

flotas, bajo pabellones de varios países, competían por el pescado a miles de kilómetros de su patria de origen. En 1982, las Naciones Unidas adoptaron el Convenio de la Ley del Mar, que permite a los estados costeros reclamar zonas económicas exclusivas que se internen 200 millas náuticas en alta mar. Estas áreas incluyen las plataformas continentales, de unos 200 metros de profundidad, muy productivas y donde viven la mayoría de las especies de peces.

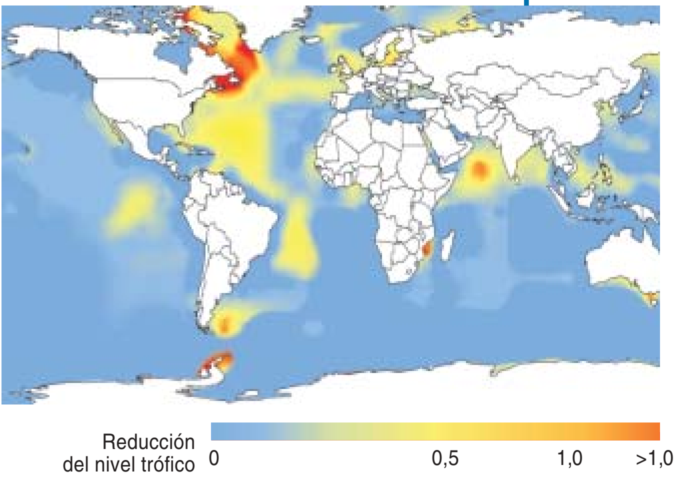
El convenio terminó con décadas (y, en algunos casos, incluso siglos) de disputas por las áreas de pesca costeras, pero hizo recaer en los países marítimos la responsabilidad de gestionar las pesquerías marinas. Por desgracia, no podemos señalar ningún país que haya cumplido ejemplarmente con sus obligaciones.

Los gobiernos de Estados Unidos y Canadá han subvencionado el desarrollo de flotas pesqueras domésticas que ocuparan el lugar de las extranjeras en las aguas que ahora éstas tenían vedadas. Canadá sustituyó los barcos extranjeros con nuevas flotas, mayores y modernizadas, que pescan durante todo el año en las mismas poblaciones que la flota doméstica de bajura ya estaba explotando. Para que no haya ninguna posibilidad de que las flotas extranjeras pesquen los excedentes de los cupos (según estipula el convenio), estos países han empezado asimismo a incrementar su actividad. Y algunos, como los estados de Africa occidental, se han visto presionados por otros para aceptar acuerdos que permitan que flotas extranjeras pesquen en sus aguas, tal y como el convenio sanciona. El resultado final ha sido una explotación inusitada, porque las flotas extranjeras no tienen ningún incentivo que las mueva a preservar a largo plazo los recursos marinos locales. Además reciben subsidios de sus propios países para acopiar tanto pescado como puedan.

La expansión posibilitada por el Convenio de la Ley del Mar y las mejoras técnicas en las artes de pesca comerciales (como los buscadores acústicos de peces) dispararon temporalmente las capturas. Pero hacia los primeros años de la década de 1980, la tendencia al aumento empezó a invertirse, a pesar de los informes exagerados de China, que, con el fin de cumplir con los "aumentos de productividad", afirmaba que capturaba casi el doble de la cantidad que realmente obtenía.

En 2001 presentamos un modelo estadístico que nos permitía examinar en qué lugares las capturas diferían de las obtenidas en aguas de productividad parecida, en las mismas profundidades y latitudes, de otras partes del mundo. Las cifras correspondientes a las aguas chinas (alrededor del 1 por ciento de los océanos del mundo) eran muy superiores a lo predicho; suponían más del 40 por ciento de las desviaciones del modelo estadístico. Cuando reajustamos los datos de las pesquerías de todo el mundo teniendo en cuenta las tergiversaciones de China, llegamos a la conclusión de que los desembarcos mundiales han venido disminuyendo lentamente desde finales de los años ochenta, a razón de unas 700.000 toneladas métricas anuales. La falsa información china sesgó de manera muy importante las estadísticas pesqueras, porque el país es muy grande y también por el grado en que exageraba. Otras naciones suministran estadísticas pesqueras inexactas (unos cuantos países exageran asimismo sus capturas y la mayoría ofrecen datos que las reducen), pero estos números tienden a cancelarse mutuamente.

Puntos calientes de la sobrepesca



1. LA SOBREPESCA redujo la complejidad de las cadenas tróficas en más de un nivel trófico entre los años 1950 y 2000. Por lo general, en alta mar hay pocos peces.

NINA FINKEL

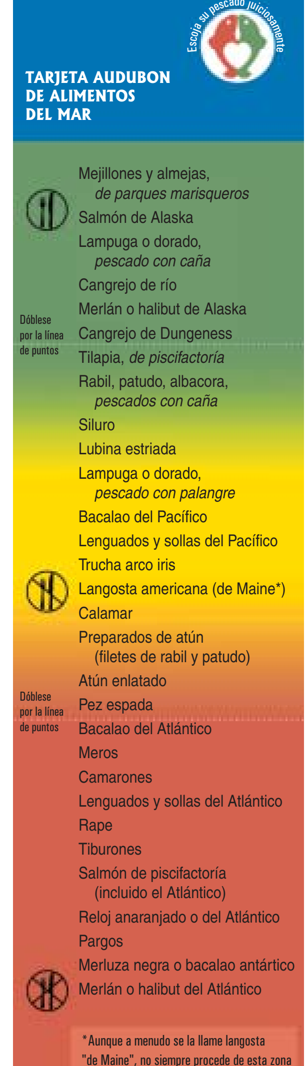
Los países recopilan estadísticas, de diverso tipo, de los desembarcos de pescado: estudios, censos o libros de bitácora. En China, estos datos se envían a oficinas regionales; desde allí van subiendo por la jerarquía gubernamental hasta las instituciones nacionales. En cada paso, los funcionarios pueden manipular las estadísticas para que se ajusten a los objetivos de producción decretados. Otros países poseen sistemas que contrastan los datos de los desembarcos con los de las importaciones y exportaciones, y con las informaciones sobre el consumo local.

Las pruebas más convincentes, en nuestra opinión, de que la pesca está produciendo estragos en los ecosistemas marinos conciernen al fenómeno que uno de nosotros (Pauly) ha calificado de "pescar cada vez más abajo de la red trófica". Se refiere a lo que ocurre cuando se esquilman los grandes peces depredadores situados en la cúspide de la cadena trófica (atunes o el pez espada) hasta que escasean; luego, se pasa a las especies más pequeñas, que por lo general serían comidas por los peces grandes (*véase el recuadro* "Pescar cada vez más abajo de la red trófica").

Los autores

DANIEL PAULY y REG WATSON son investigadores del proyecto El Mar que Nos Rodea, de Vancouver, encuadrado en el Centro de Pesquerías de la Universidad de la Columbia Británica. Pauly estudió antes las pesquerías tropicales, ha diseñado programas informáticos para evaluar las poblaciones de peces y creado FishBase, la enciclopedia en línea de los peces del mundo. Los intereses de Watson incluyen la modelización pesquera y la cartografía informática.





2. LOS PECES que, fileteados o enteros, se encuentran en las pescaderías han sido diezmados por la sobrepesca. Los pescadores han de utilizar técnicas cada vez más complejas y pescar cada vez más lejos de la costa y a mayores profundidades para capturar estas especies. En los Estados Unidos, la Sociedad Nacional Audubon y otras organizaciones han editado folletos y tarjetas (*izquierda*) para que los consumidores eviten las especies sobrepescadas (*rojo*) o aquellas cuya situación es preocupante (*amarillo*).

JASON ESKENAZI (*fotografía*); PROGRAMA MARES VIVOS, AUDUBON (*tarjeta*)

Pescar cada vez más abajo de la red trófica

La posición que una especie ocupa en los niveles de una red trófica está determinada por su tamaño, la anatomía de sus partes bucales y sus preferencias alimentarias. Las capas de la red alimentaria, los niveles tróficos, se ordenan según los estratos que las separan de los productores primarios sitos en la base de la red, algas fitoplanctónicas, por lo común. A estos organismos microscópicos se les asigna un nivel trófico (NT) de 1.

El fitoplancton es pastado principalmente por el pequeño zooplancton, sobre todo por diminutos crustáceos que tienen un tamaño que oscila entre 0,5 y dos milímetros; el zooplancton tiene así un NT de 2. (Esta jerarquía de tamaño contrasta con las cadenas tróficas terrestres, en las que los herbívoros suelen ser muy grandes; piénsese en los ciervos o los elefantes, por ejemplo.) El NT 3 está formado por peces de entre 20 y 50 centímetros de longitud, como las sardinas, los arenques y los boquerones. Se trata de peces pelágicos que viven en aguas abiertas y suelen consumir una mezcla variable de zooplancton herbívoro y carnívoro. Las pesquerías capturan cantidades enormes de estos animales: el año 2000 se desembarcaron 41 millones de toneladas, número que corresponde al 49 por ciento de las capturas marinas mundiales. La mayoría se destina al consumo humano o se transforma en harina y aceite de pescado para piensos de pollos, cerdos o salmones (u otros peces carnívoros criados en acuicultura).

Los típicos peces de mesa (el bacalao, los pargos, los atunes, el merlán que se sirven enteros, en tajadas o en filetes) son depredadores de los pelágicos pequeños y de otros peces e invertebrados de poca talla; suelen tener un NT de entre 3,5 y 4,5. (Su NT no es un número entero porque pueden consumir presas de varios niveles tróficos.)

El aumento de su popularidad como alimento nutritivo ha contribuido a la reducción de sus poblaciones. Sugerimos que la salud y la sostenibilidad de las pesquerías pueden evaluarse con el seguimiento de la tendencia de los NT promedio. Cuando estos números empiezan a bajar, ello significa que las pesquerías recurren a peces cada vez más pequeños y que las poblaciones de los mayores depredadores empiezan a desplomarse.

En 1998 presentamos pruebas de que ya se estaba descendiendo por la red trófica en algunos bancos de pesca, en especial en el Atlántico Norte; en aguas de la costa de la Patagonia, en Sudamérica y la Antártida inmediata; en el mar Arábigo, y alrededor de zonas de Africa y Australia. Dichas áreas experimentaron reducciones en los NT de 1 o más entre 1950 y 2000, según nuestros cálculos (*véase el mapa de la figura 1*). En aguas de la costa occidental de Terranova, por ejemplo, el NT promedio pasó de un máximo de

3,65 en 1957 a 2,6 en 2000. El tamaño medio de los pescados desembarcados en estas regiones se redujo en un metro durante dicho período.

Nuestras conclusiones se fundamentan en un análisis de la base de datos global de desembarcos que ha creado y mantiene la Organización para la Alimentación y la Agricultura de las Naciones Unidas, que a su vez deriva de los datos que proporcionan los países miembros. Debido a que este conjunto de datos presenta problemas (la exageración de los informes o la mezcla de varias especies en la categoría denominada "mixtos"), tuvimos que incorporar información sobre la distribución global de peces procedente de FishBase, la enciclopedia de peces en línea que Pauly inició, así como información sobre las pautas de pesca y los derechos de acceso de las naciones que informaban de sus capturas.

La investigación por parte de otros grupos (en especial los dirigidos por Jeremy B. C. Jackson, de la Institución Scripps de Oceanografía, en San Diego, y por Ransom A. Myers, de la Universidad Dalhousie) sugiere que nuestros resultados, por calamitosos que puedan parecer, en realidad subestiman la gravedad de los efectos que las pesquerías tienen sobre los recursos en los que se basan. Jackson y sus colegas han demostrado que existieron reducciones enormes en las poblaciones de mamíferos marinos, tortugas y grandes peces, a lo largo de todas las costas y mucho antes del período posterior a la segunda guerra mundial que nosotros examinamos. La trascendencia de estas reducciones no se reconoció hasta hace poco porque los biólogos no consultan a los historiadores ni colaboran con los arqueólogos, que estudian las pruebas del consumo de pescado en antiguos restos de basura.

El grupo de Myers utilizó datos de una amplia gama de pesquerías de todo el mundo para demostrar que las flotas industriales sólo tardan unas docenas de años en reducir por un factor de 10 la biomasa de una población previamente no sometida a explotación. Puesto que suele requerir más tiempo establecer un régimen regulador para gestionar un recurso marino, es muy probable que los niveles de sostenibilidad establecidos se basen en números que ya reflejan la reducción de las poblaciones. El grupo de Myers documenta este proceso sobre todo para la pesca japonesa de palangre, que en 1952 traspasó las aguas niponas, de donde no había salido hasta el final de la guerra de Corea. Se expandió por el océano Pacífico; llegó al Indico y el Atlántico. La expansión diezmó las poblaciones de túnidos de todo el mundo. Myers y Boris Worm han informado recientemente de que los océanos mundiales han perdido el 90 por ciento de los grandes peces depredadores.

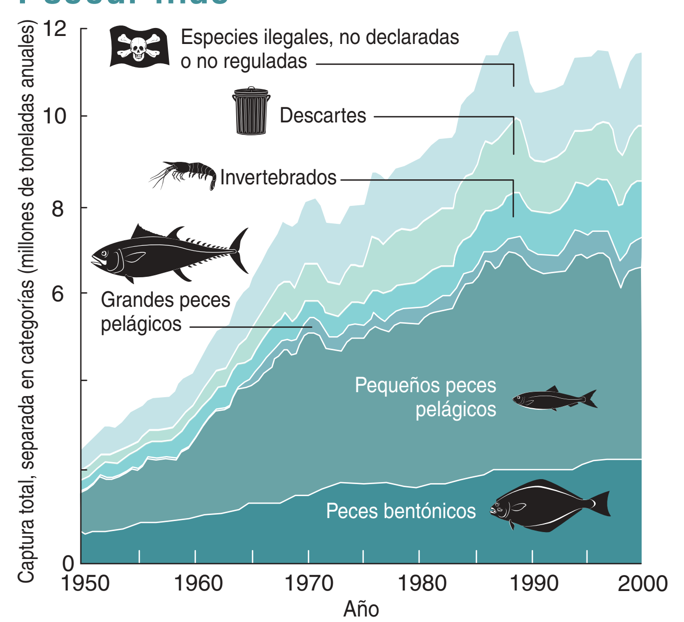
Cambiar el futuro

¿Qué puede hacerse? Muchos creen que la acuicultura marina aliviará la presión sobre las poblaciones. Ahora bien, sólo podrá hacerlo si los organismos que se crían no consumen pienso de pescado. (Se pueden criar mejillones, almejas y tilapias, un pez herbívoro, sin pienso de pescado.) Cuando se echa pienso a los peces, como en el caso del salmón y de varios carnívoros, la acuicultura agrava el problema, al convertir en pienso para animales a pequeños pelágicos (entre los que hay algunos adecuados para el consumo humano, como los arenques, sardinas, boquerones y caballas). En realidad, las piscifactorías de salmones consumen más pescado del que producen: pueden ser necesarios tres kilogramos de pienso de pescado para obtener un kilogramo de salmón.

Una manera de resolver las dificultades que ahora acosan a las pesquerías es la gestión de base ecosistémica, que debería buscar mantener (o restablecer) la estructura y la función de los ecosistemas en los que las pesquerías se hallan integradas. Obligaría a considerar los requerimientos alimentarios de las especies clave en los ecosistemas (notablemente las de los mamíferos marinos), eliminando por fases las artes que destruyen el fondo marino, y poniendo en funcionamiento reservas marinas, o "zonas santuario", para mitigar los efectos de la pesca. Tales estrategias son compatibles con el conjunto de reformas que hace años vienen proponiendo científicos y economistas: reducir radicalmente la capacidad de la flota global; abolir los subsidios gubernamentales que mantienen en el mar flotas no rentables, y hacer cumplir de manera estricta las restricciones sobre las artes que dañan los hábitats o capturan "descartes", especies que en último término serán desechadas.

Crear áreas protegidas donde no se permita la explotación será clave para preservar las pesquerías. Algunos refugios tendrán que estar próximos a tierra firme, para proteger a las especies costeras; otros de-

Pescar más



3. LA CANTIDAD DE PESCADO DESEMBARCADO se ha quintuplicado de lejos en los últimos 50 años. A medida que la población mundial aumentaba, la técnica aplicada por la pesca comercial ha progresado y la demanda se ha disparado en algunos países.

NINA FINKEL (*gráfica*); CLEO VILETT (*ilustraciones*)

berán ser grandes y hallarse en alta mar, para preservar a los peces oceánicos. En la actualidad ya existen áreas protegidas, pero son pequeñas y están dispersas. La superficie total protegida de una u otra forma de pesca supone un escueto 0,01 por ciento de la superficie del océano. Ahora las reservas son vistas por los pescadores (e incluso por los gobiernos) como concesiones necesarias ante la presión conservacionista, pero habrán de convertirse en instrumentos que protejan a las especies explotadas por la sobrepesca.

Un objetivo prioritario tendrá que ser la conservación de especies que antaño se mantenían a grandes profundidades y alejadas de la costa, antes de que los pescadores desarrollaran artes mejoradas para ir en su búsqueda. Este tipo de pesca recuerda a una explotación minera no renovable: en las oscuras y frías profundidades abisales los peces son muy vulnerables, de vida larga y de productividad muy baja. Estas medidas permitirían que las pesquerías, por primera vez, fueran sostenibles.

Bibliografía complementaria

HISTORICAL OVERFISHING AND THE RECENT COLLAPSE OF COASTAL ECOSYSTEMS. Jeremy B. C. Jackson *et al.*, en *Science*, vol. 293, págs. 629-638; 27 de julio de 2001.

SYSTEMATIC DISTORTION IN WORLD FISHERIES CATCH TRENDS. Reg Watson y Daniel Pauly, en *Nature*, vol. 414, págs. 534-536; 29 de noviembre de 2001.

UNNATURAL OCEANS. Jeremy B. C. Jackson y Enric Sala, en *A Marine Science Odissey into the 21st Century* (dirigido por J. M. Gili, J. L. Pretus y T. T. Packard), págs. 273-281. *Scientia Marina*, Barcelona, 2001.

IN A PERFECT OCEAN: THE STATE OF FISHERIES AND ECOSYSTEMS IN THE NORTH ATLANTIC OCEAN. Daniel Pauly y Jay Maclean. Island Press, 2003.

RAPID WORLDWIDE DEPLETION OF PREDATORY FISH COMMUNITIES. Ransom A. Myers y Boris Worm, en *Nature*, vol. 423, págs. 280-283; 15 de mayo de 2003.

Estimulación de la germinación y el crecimiento por exposición a campos magnéticos

El tratamiento magnético de semillas y el riego con agua tratada magnéticamente permite aumentar el porcentaje y velocidad de germinación, así como la longitud y el peso de las plantas

Elvira Martínez, M.ª Victoria Carbonell, Mercedes Flórez



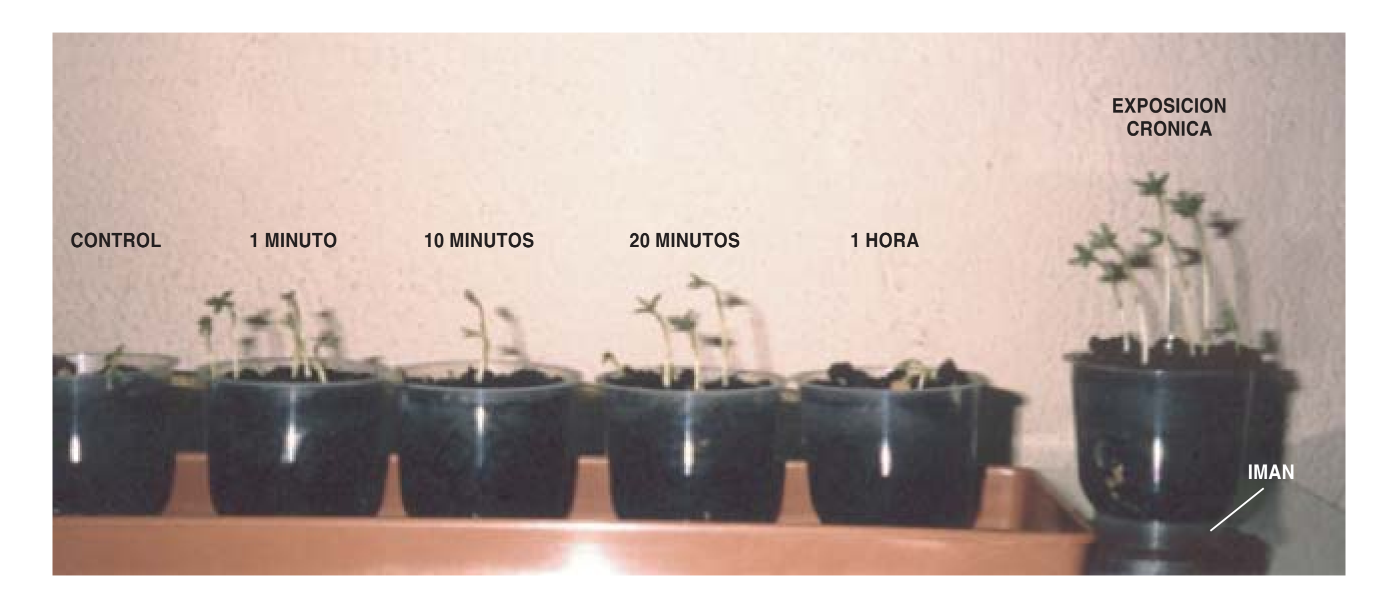
1. IMAN usado para generar un campo magnético de 0,250 tesla.

ELVIRA MARTINEZ, M.ª VICTORIA CARBONELL Y MERCEDES FLOREZ

Desde las prácticas pseudoterapéuticas de August Mesmer (1734-1815), las propiedades sanadoras de los imanes y del magnetismo en general se han considerado siempre marginales a la ciencia. Esa recurrente apelación a poderes invisibles de los campos magnéticos ha vuelto a cobrar especial auge con el agua tratada magnéticamente, la llamada "agua magnetizada o imantada". Pero las fábulas que rodean a determinadas presentaciones no debe retraernos de estudiar la importancia real del magnetismo en biología.

De hecho, en los últimos años, se ha intensificado la investigación sobre los efectos que ejercen los campos magnéticos sobre los organismos. Paralelamente, un creciente desarrollo técnico ha provocado la aparición de radiaciones electromagnéticas artificiales, cuya repercusión en los seres vivos está todavía por estudiar. Debido en buena medida a ello, se ha suscitado cierta alarma social ante la posible incidencia de los campos magnéticos variables, creados por líneas de alta tensión y antenas de telefonía móvil, en la salud.

La investigación en campos magnéticos, lo mismo estáticos (creados por imanes) que variables (producidos por bobinas y electroimanes), aplicada a la agricultura se ha centrado en la utilización de diferentes intensidades de campo y tiempos de exposición. Aunque la mayoría de los estudios se ocupan del análisis de la velocidad y porcentaje de germinación, longitud y peso de las plantas, no se han descuidado otros aspectos: coloración de los frutos, actividad enzimática y fotosintética, res-



2. PLANTAS DE LENTEJA sometidas a los tiempos de exposición indicados. En la maceta de la derecha, que se encuentra sobre un imán de 0,125 tesla, se observa mayor longitud de las plántulas, transcurrida una semana; en la maceta de la izquierda se manifiesta el retardo de las plantas control, sin exposición a campo magnético. Se trata, pues, de una especie altamente sensible.

piración y pérdida de calor, contenidos en gluten, albúmina, etcétera.

En el departamento de física y mecánica de la Universidad Politécnica de Madrid, el grupo de bioelectromagnetismo aplicado a la agricultura se ha propuesto un doble objetivo principal. En primer lugar, determinar si existe respuesta biológica en la germinación de semillas y primeros estadios de crecimiento, cuando se someten a campos magnéticos, a riego con agua tratada magnéticamente o a ambos. En segundo lugar, identificar qué cambios se operan en las propiedades físicas y químicas del agua magnetizada.

Para la consecución del primer objetivo se realizan ensayos que permiten evaluar la velocidad, porcentaje de germinación y diferentes parámetros de crecimiento de plantas. El tratamiento magnético de las semillas se realiza por exposición a campos magnéticos estáticos creados por imanes de 0,125 y 0,250 tesla, durante diferentes intervalos de tiempo, que van de un minuto a un día, o a exposición crónica.

Hemos comprobado, en los ensayos de germinación, que aumenta la velocidad y el número de semillas germinadas si se las somete a un campo magnético o se riegan con agua magnetizada. En los ensayos de crecimiento se ha obtenido, a su vez, que las plántulas expuestas a campo magnético presentan mayor longitud y peso. Del análisis de los resultados se desprende que los incrementos registrados en geminación de semillas y en crecimiento de plantas tratadas permiten considerar al campo magnético un agente estimulante. Y de acuerdo con la respuesta emitida por cada especie podemos elaborar una clasificación de las plantas en función de su magnetosensibilidad.

Hemos trabajado con lenteja (*Lens culinaris*, L.), cardo (*Cynara cardunculus*, L.), tomate (*Lycopersicum lycopersicum*, L.), girasol (*Heliantus annuus*, L.), trigo (*Triticum aestivum*, L.), maíz (*Zea mays*, L.), cebada (*Hordeum vulgare*, L.) y arroz (*Oryza sativa*, L.). En la actualidad la investigación se extiende a otras especies.

Para evaluar el efecto de los campos magnéticos variables en cardos y lentejas, empleamos bobinas Helmholtz de 75 cm de diámetro, que inducen un campo de 50 hertz y 15 microtesla (1 tesla equivale a 10^4 gauss), semejante al producido en la base de las líneas de alta tensión. Se inhibía así el crecimiento. Con un campo magnético estático, por el contrario, se fomentaba el desarrollo.

Propiedades físico-químicas del agua

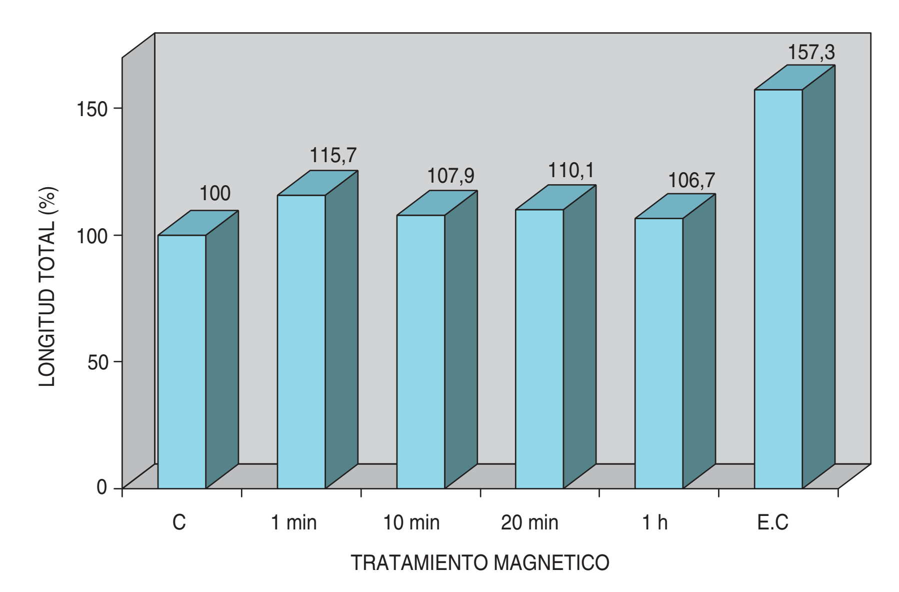
En paralelo a lo anterior se han realizado otros ensayos para determinar la modificación de las propiedades físico-químicas del agua cuando se la somete a un tratamiento magnético. Se realiza éste mediante recirculación durante diferentes intervalos de tiempo, en un circuito en doble hélice. Hay instaladas en él seis baterías magnetizadoras, constituidas por dos imanes de 0,125 tesla, con sus polos norte enfrentados.

Las propiedades del agua analizadas abarcan desde el *p*H hasta la tensión superficial, pasando por la conductividad eléctrica, solubilidad

Las autoras

ELVIRA MARTINEZ, M.ª VICTORIA CARBONELL y MERCEDES FLOREZ son profesoras del departamento de física y mecánica fundamentales y aplicadas a la ingeniería agroforestal de la Escuela de Ingenieros Agrónomos de Madrid. En la actualidad trabajan en la aplicación del bioelectromagnetismo a la agricultura. Investigan, en particular, el efecto ejercido sobre la germinación y desarrollo de plantas por la acción de campos magnéticos, y en la modificación de ciertas propiedades del agua cuando se expone a un campo magnético estático.

ELVIRA MARTINEZ, M.ª VICTORIA CARBONELL Y MERCEDES FLOREZ



3. LONGITUD TOTAL de las plantas de lenteja, expresada en porcentajes respecto al control (C), para los distintos tiempos de exposición, transcurridas dos semanas desde la siembra. Se observa la mayor longitud obtenida en todos los tratamientos magnéticos. Sobresale el incremento del 57,3 % para exposición crónica (EC). En las lentejas un minuto de exposición basta para provocar incrementos de longitud.

a diferentes temperaturas y evaporación. Se observa un incremento en la solubilidad de distintas sales disueltas en agua magnetizada, principalmente carbonato cálcico, lo mismo que una mayor conductividad eléctrica. El incremento en la solubilidad posibilita una mejor absorción y aprovechamiento de nutrientes que se traduce en un mayor crecimiento de las plantas.

Magnetismo y seres vivos

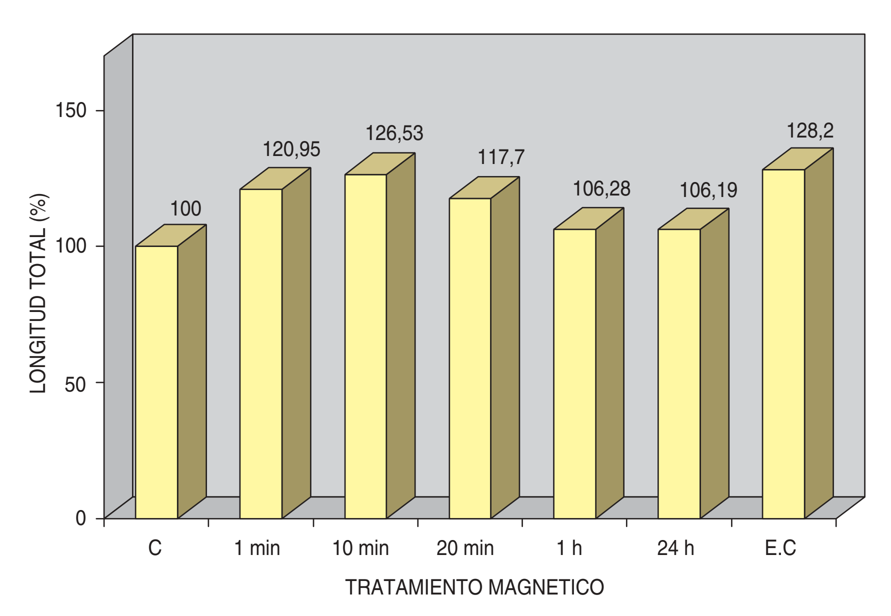
A lo largo de la historia de la ciencia se han utilizado los fenómenos físicos antes incluso de haber entendido plenamente su naturaleza. Ocurrió así con la electricidad animal desde los trabajos de Luigi Galvani o Alessandro Volta en ranas. También en el cuerpo humano el sistema nervioso responde a estímulos eléctricos. De una manera general, los seres vivos estamos sometidos al campo magnético terrestre, cuyo valor oscila, dependiendo de la latitud, entre 0,04 y 0,06 militeslas. Varía, además, en función de las estaciones y la actividad solar.

Las células de algunos microorganismos contienen entre el 0,5 y el 2 % de magnetita (Fe_3O_4). La alineación de estos cristales en cadenas, los magnetosomas, dota al microorganismo de momentos magnéticos de intensidad suficiente para orientarlo por el espacio. Las células los biosintetizan a partir de complejos orgánicos solubles cuando existen en el medio acuático concentraciones de Fe entre 1 y 2 miligramos por litro.

Se han encontrado también cristales de magnetita en el cráneo de las palomas mensajeras, en delfines y algunas especies de ratones. Ciertas algas de las costas de Brasil se orientan hacia el sur magnético; de esta forma se dirigen hacia los fondos de las lagunas. Algunos peces se desplazan según el campo magnético terrestre. Las termitas construyen sus termiteros siguiendo la dirección norte-sur; las abejas se orientan y comunican bajo la influencia de estos campos, además de recibir información de los cambios meteorológicos.

En el hombre muestran sensibilidad a la influencia magnética ciertos puntos del cerebro, los tendones de los músculos del cuello, las masas lumbares y el tendón de Aquiles. En fecha reciente se ha descubierto la presencia de cristales de magnetita en los tejidos cerebrales.

Uno de los aspectos más interesantes de este dominio concierne al impacto de la radiación electromagnética no ionizante en la membrana plasmática, que rodea a la célula. Su efecto viene mediado por el ion calcio. Los componentes grasos de la membrana son fosfolípidos, moléculas diamagnéticas; como tales, se orientan en sentido contrario al del campo magnético



4. LONGITUD TOTAL de las plantas de girasol, expresada en porcentaje respecto al control (C) para los distintos tiempos de exposición, transcurridas dos semanas desde la siembra. Se observa la mayor longitud obtenida en todos los tratamientos magnéticos. Sobresale el incremento porcentual del 28,2 % para exposición crónica (EC).

ELVIRA MARTINEZ, M.ª VICTORIA CARBONELL Y MERCEDES FLOREZ

aplicado. Así, el campo modifica su orientación y, en consecuencia, el Ca^{2+} ligado a ambos lados de la membrana se libera por el efecto combinado de repulsión eléctrica y diamagnetismo. Para hacernos una idea del alcance de ese fenómeno conviene tener presente que el calcio regula un sinfín de procesos; por citar algunos: transporte iónico a través de la membrana, permeabilidad de la membrana, división y proliferación celular, funciones enzimáticas, excitación neuronal, concentración muscular, secreción endocrina y exocrina y liberación de neurotransmisores.

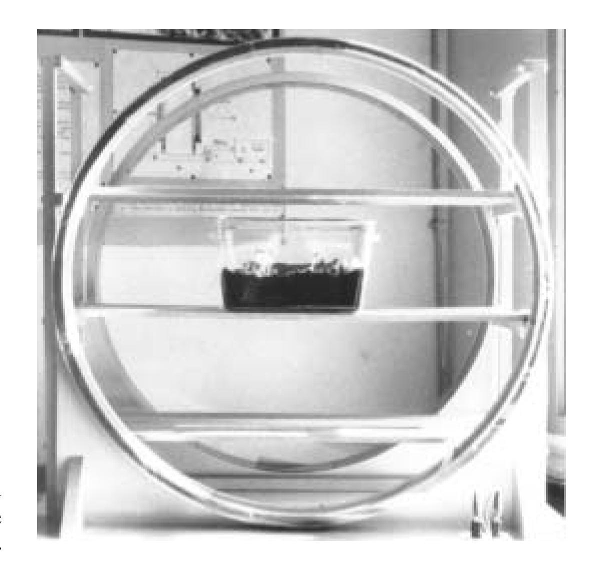
Aplicación de campos magnéticos en la agricultura

En las plantas de cultivo son muchos los factores a considerar que se ven condicionados por la presencia de un campo magnético. El proceso puede abordarse desde una triple óptica, a saber, desde el punto de vista de la acción directa sobre el ser vivo, la acción sobre el agua y la acción sobre el suelo.

Los primeros estudios de la acción directa de los campos magnéticos sobre la planta se remontan a 1930. P. V. Savostin observó aumentos en la elongación de plántulas de trigo bajo la influencia de dichos campos. Estudios posteriores muestran su influencia en germinación de semillas y desarrollo de plantas. Suele corroborarse un efecto estimulante del crecimiento y desarrollo de plantas sometidas a la acción de campos magnéticos estáticos e inhibitorio de los campos variables.

En el caso de la acción de campos magnéticos estáticos, se han obtenido aumentos en la germinación de semillas de cebolla y arroz de baja viabilidad que habían sido expuestas a un campo magnético durante diferentes intervalos de tiempo. Se ha visto que la aplicación de un estímulo magnético externo, previo a la siembra, produce un aumento de germinación y vigor de las plántulas. En otros ensayos, aunque el porcentaje de germinación era el mismo, aumentaba la velocidad de germinación y como consecuencia se producían plantas más precoces; en algunos casos presentaban mayor pigmentación y contenido en hidratos de carbono.

En el caso de la acción de campos magnéticos variables, los efectos producidos dependen de la frecuencia, intensidad, forma de la onda y otras propiedades del campo. Para semillas de cebolla, por ejemplo, se comprobó que la respuesta al tratamiento era mayor cuando el tiempo de exposición era de 30 minutos que cuando se prolongaba 60 minutos. Al aplicar campos alternos de frecuencia extremadamente baja aumentaba la relación tallo/raíz en plántulas de arroz. En otros ensayos, queda patente la relación entre el aumento de la velocidad de germinación y el crecimiento del tallo con el aumento de la frecuencia.



5. MACETA CON PLANTAS de lenteja situada en el interior de una bobina Helmholtz que genera un campo magnético variable de 50 hertz y 15 microtesla, análogo al creado en las proximidades de un tendido eléctrico de alta tensión.

Al abordar la influencia de la orientación de las semillas durante el tratamiento magnético, se ha advertido un mayor crecimiento si el eje longitudinal de las semillas se halla orientado en la dirección norte-sur. En las semillas de mostaza, por ejemplo, la polaridad de los imanes influye en la longitud de la planta, número de brotes, peso y producción de la cosecha. Otros ensayos se han esforzado por poner de manifiesto no tanto el aumento de la producción cuanto el enriquecimiento en determinados metabolitos (albúmina, gluten y almidón) o la maduración precoz (a través de la activación de las auxinas en tomates).

La propia tasa de respiración de semillas tratadas difiere de las semillas no expuestas al condicionamiento magnético. En cierto ensayo, las primeras, con campos de 0,018 tesla, usaban un 12 % menos de oxígeno que las no tratadas durante las 5 primeras horas; dos horas después del comienzo del test la diferencia en la respiración era del 7 %. Algo parecido puede predicarse de la temperatura. Se apre-



ELVIRA MARTINEZ, M.ª VICTORIA CARBONELL Y MERCEDES FLOREZ



6. EQUIPO magnetizador de agua.

ELVIRA MARTINEZ, M.ª VICTORIA CARBONELL Y MERCEDES FLOREZ

ció un aumento de 0,25 ºC durante el período de germinación en las semillas de cebada tratadas con campos de 0,12 tesla respecto a las semillas sin tratar.

Acción de los campos magnéticos sobre el agua

En promedio, un 70 % del organismo es agua. Cabe, pues, investigar la interacción entre campos magnéticos y seres vivos siguiendo el mecanismo de acción de aquéllos a través del agua. Cuando una corriente de agua atraviesa un campo magnético de intensidad y dirección adecuada, sus moléculas se ordenan; en consecuencia, se producen ciertas modificaciones en sus propiedades. En particular, se produce un cambio en el sistema de cristalización y una modificación de la solubilidad de las sales en agua.

Las sales de calcio son las que más abundan en las aguas potables; cuando el agua se evapora, se forma carbonato cálcico que se deposita en las tuberías. (Una aplicación directa del cambio de cristalización y solubilidad de sales es su uso como descalcificador de tuberías.) El carbonato cálcico puede cristalizar en forma de calcita o espato de Islandia (trigonal) o en forma de aragonito (rómbico). Cuando el agua se somete a tratamiento magnético, el carbonato cálcico presente en forma de calcita se transforma en microcristales de aragonito, que son arrastrados en forma de barros. También se ha observado un aumento de la velocidad de coagulación de las partículas en suspensión. En el agua tratada magnéticamente las moléculas de agua se hallan conectadas más débilmente con la suspensión, por lo que tienen más libertad de movimiento; si se acercan a una distancia inferior a la de acción de las fuerzas de Van der Waals, precipitan.

Las aguas ricas en iones bicarbonato pueden provocar la precipitación de los cationes calcio y magnesio al estado de carbonatos, a medida que la solución del suelo va concentrándose por la absorción del agua realizada por las raíces y por la evaporación. Esta precipitación de los iones calcio y magnesio, que no llega nunca a ser total, constituye un serio peligro, ya que, al reducirse las concentraciones de calcio y magnesio, aumenta la proporción relativa de sodio. El riego con agua rica en sodio puede dar lugar a la sodificación del suelo (sustitución del calcio por sodio), lo que provoca la destrucción de su estructura y disminuye la permeabilidad.

Se ha observado que el *p*H y la solubilidad de soluciones de carbonato y cloruro sódico sometidas a campos magnéticos estáticos de 200-1600 gauss son superiores a los de los controles. Por eso se ha aplicado el tratamiento magnético del agua para el lixiviado de suelos y aumento consiguiente de la producción de las cosechas, que se cifra entre el 15 y el 20 %.

Además hay que destacar que el tratamiento magnético del agua es de extremada sencillez y economía. Los métodos empleados se dividen en estáticos y dinámicos, según el agua permanezca en reposo o en movimiento respecto al campo. El método estático consiste en introducir el recipiente que contenga el agua a imantar en un campo magnético creado por un imán/bobina; en esta situación, el único movimiento que posee el agua con respecto al campo magnético es el correspondiente a la agitación térmica de las moléculas de agua; la intensidad del campo magnético debe ser superior a 800 gauss y permanecer en las proximidades del líquido varias horas.

Acción de los campos magnéticos sobre el suelo

Es posible que en todos los trabajos realizados sobre el efecto del campo magnético en el crecimiento de plantas se haya producido, además, una modificación del medio que ha servido de sustrato. Del análisis conjunto de la alteración del suelo y el desarrollo de la planta, se desprende que la aplicación de campos magnéticos de 1500-3500 gauss durante 15-30 minutos produce un aumento del grado de agregación del suelo en función de sus componentes paramagnéticos y ferromagnéticos, favoreciéndose el desarrollo de la planta.

Bibliografía complementaria

INHIBITION IN THE GROWTH OF THISTLES (*Cynara cardunculus*, L.) AND LENTILS (*Lens culinaris*, L.) DUE TO CHRONIC EXPOSURE TO 50 HZ AND 15 MT ELECTROMAGNETIC FIELDS. M. L. Picazo *et al.*, en *Electro- and Magnetobiology*, vol. 18, n.º 2, págs. 147-156; 1999.

STIMULATION OF GERMINATION IN RICE (*Oryza sativa* L.) BY A STATIC MAGNETIC FIELD. M. V. Carbonell *et al*, en *Electro- and Magnetobiology*, vol. 19, n.º 1, págs. 121-128; 2000.

STIMULATION ON THE INITIAL STAGES ON GROWTH OF BARLEY (*Hordeum vulgare*, L.) BY 125 MT STATIONARY MAGNETIC FIELD. E. Martínez *et al.*, en *Electro- and Magnetobiology*, volumen 19, n.º 3, páginas 271-277; 2000.

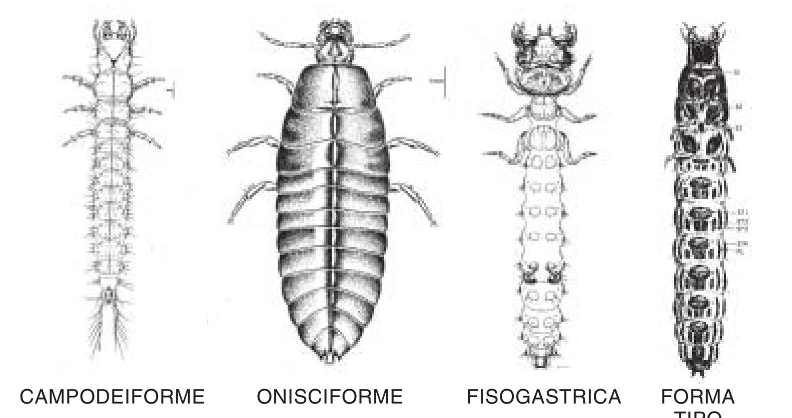
Carábidos

Morfología larvaria

Los coleópteros, junto con las mariposas, han sido objeto preferente de estudio de los entomólogos de todos los tiempos. Llamaron la atención los carábidos en particular. Abarcan éstos formas de escarabajos llamativas, incluso por su talla. Más allá de su variopinta morfología externa, descrita por los naturalistas desde hace siglos, importa destacar su papel en el mantenimiento del equilibrio de ecosistemas forestales y agrícolas; ya a comienzos del siglo pasado *Calosoma sycophanta* L. fue introducido en bosques de Norteamérica para paliar el incremento poblacional de ciertas orugas nocivas.

Abarcan los carábidos numerosas especies, de suma importancia en los sistemas edáficos. Allí han desarrollado estrategias adaptativas muy diversas y han adquirido una gran sensibilidad ante los cambios ambientales; por su predominante condición depredadora se han convertido en elementos terminales de las cadenas tróficas. En general, se consideran una herramienta útil en estudios de ecología comparada y evaluación ambiental; en efecto, los carábidos ofrecen una gama muy extensa de ciclos reproductores, selección de hábitat, tipología y morfología de los individuos, así como de respuestas fisiológicas y de conducta.

La tradición entomológica, centrada en las formas adultas, había dejado en segundo plano el estudio de las fases inmaduras, pese a su interés en el establecimiento de vínculos evolutivos y filogenéticos, que repercuten en las clasificaciones. La razón de tal postergación es múltiple: condición endogea, aspecto críptico y etología discreta de las larvas de muchas especies, dificultades inherentes a la obtención de formas inmaduras mediante cultivos en laboratorio y falta de bibliografía que permita la correcta asignación específica de larvas recolectadas en su ambiente natural.



1. Habitus *dorsal de distintos tipos de larvas de carábidos y* habitus *ventral de una larva tipo. Modificado de F. W. Stehr (*Immature Insects*, vol. 2, 1991)*

Como gran parte de los insectos, los carábidos son holometábolos, es decir, tras la eclosión, el ciclo biológico atraviesa una o varias fases larvarias, un período quiescente denominado "pupa" y una estado final de imago o adulto. Cada fase constituye una expresión fenotípica distinta de un mismo genotipo. Debido al exoesqueleto quitinoso que las recubre, las larvas experimentan mudas para crecer, cuyo número determinará el de estadios larvarios: dos mudas y tres fases larvarias es la norma general para los Carabidae, aunque existen excepciones que se interpretan como adaptaciones a ambientes o formas de vida particulares, pudiendo entonces oscilar entre una, como ocurre en algunas especies cavernícolas del género *Aphaenops,* y las cinco que se dan entre las formas parasitoides del género *Brachinus*.

Salvo en la talla y en el progresivo desarrollo de la quetotaxia, las larvas de distinta edad no suelen diferir entre sí. Mantienen una morfología campodeiforme, cuyo aspecto corresponde al de los primitivos insectos apterigotas (sin alas) del género *Campodea*: cuerpo alargado y esclerotizado, provisto en su extremo posterior de un par de procesos dorsales (urogonfos) con grado de desarrollo y articulación variables y que recuerdan los cercos terminales de los Dipluros Campodeidae. Excepcionalmente son onisciformes (parecidas a cochinillas de la humedad), como las del género *Cycrhus,* o fisogástricas, es decir, con hipertrofia abdominal, como *Brachinus* y *Pheropsophus*.

Asociadas siempre a ecosistemas terrestres, la actividad que desarrollan se relaciona con su condición depredadora, aunque no son raras las larvas fitófagas, que se alimentan de hojas (*Zabrus*) o semillas de gramíneas, umbelíferas o leguminosas (*Pseudophonus, Carterus*). Hay también larvas omnívoras.

Por su aspecto general, las larvas de los Carabidae pueden ser confundidas con las de otras familias de Coleópteros (Staphylinidae, Silphidae, Histeridae); sin embargo, la presencia de seis segmentos en las patas de las primeras frente a los cinco en que están divididas las de los restantes grupos resulta un rasgo suficientemente distintivo.

En cuanto al tamaño, existe un amplio rango de variación (de 2 a 50 mm). Se trata de una variabilidad no sólo interespecífica, sino que se advierte también entre distintas fases e individuos. Depende, en buena medida, de la disponibilidad de alimento.

Las larvas, móviles, carecen de ojos compuestos, de alas y élitros, así como de glándulas y piezas genitales externas. La cabeza, no muy voluminosa, prognata y sin cuello diferenciado, presenta dorsalmente una placa frontal que, en las larvas de primera edad, está provista de un par de protuberancias, carenas o series de









2. Huevo en desarrollo en el que se diferencian los ocelos, larva de tercera edad, pupa e imago de Macrothorax rugosus *(Fab.). Fotos J. M. Hidalgo*

microespinas (*ruptor ovi*) que propician la rotura de las envueltas del huevo y la emergencia posterior.

A cada lado, en la región parietal, se diferencian seis ojos simples, u ocelos, agrupados en dos filas de tres. Muy próximas a ellos, las antenas alcanzan longitud variable, por lo general bien desarrolladas y dotadas de cuatro segmentos, diferenciándose en el tercero una dilatación sensorial o vesícula exértil. Las piezas bucales, que se proyectan desde la parte anterior de la cápsula cefálica, consisten en un par de mandíbulas más o menos falciformes y con un característico diente en su borde interno (*retinaculum*), un par de maxilas, cuyos palpos suelen constar de cuatro —raramente cinco— segmentos y una pieza labial, impar, con palpos de dos o cuatro segmentos.

Dorsalmente, cada uno de los tres segmentos torácicos está cubierto por un gran esclerito dividido en la zona media y reducido allí a una delgada membrana que corresponde a la línea ecdisial por donde se rasga la vieja cutícula en los procesos de muda.

Ventralmente, el tórax resulta membranoso, mientras que en las regiones laterales (pleuras) se diferencian pequeñas piezas o escleritos (epímero y episterno) en las zonas de inserción apendicular. Las patas (tres pares) son breves, aunque robustas y espinosas, y acaban en una o dos uñas móviles y subiguales. El abdomen consta, por lo general, de 10 segmentos, con su placa tergal cada uno, donde también se evidencia la línea ecidisial, siete escleritos ventrales (*sternella*) con un grado variable de fusión en los últimos segmentos y, lateralmente, las correspondientes pleuras membranosas en las que se distinguen los espiráculos o estigmas respiratorios (8 pares). El dorso del noveno segmento se extiende en los urogonfos, que pueden ser fijos o articulados, enteros o segmentados, provistos o no espinas y de longitud también muy va-

riable; pueden incluso desaparecer en ciertas larvas parásitas y en algunas especies de *Cychrus* y *Harpalus*.

Un tubo extensible, denominado urópodo o pigópodo, en cuyo extremo se localiza el ano, representa el décimo segmento abdominal y desempeña una función locomotora suplementaria.

Sobre este plan general se produce una amplia serie de modificaciones que caracterizan las distintas líneas filéticas y cuyo estudio puede contribuir a esclarecer la sistemática de tan complejo grupo de insectos.

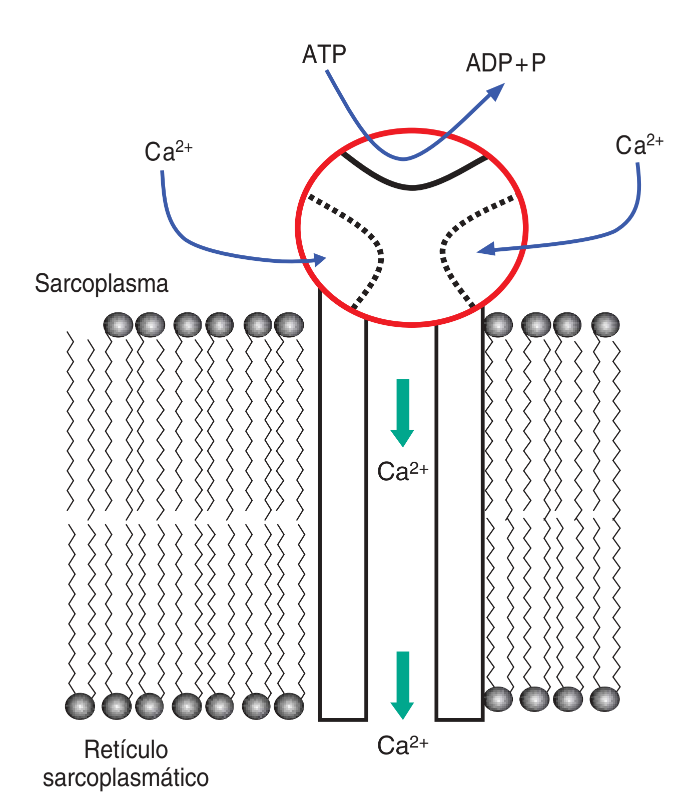
ANA Mª CÁRDENAS
Depto. de Zoología. Universidad de Córdoba

Transporte de calcio

Un sistema artificial

Las células de los organismos y sus diferentes orgánulos deben, para realizar sus funciones vitales, intercambiar un gran número de sustancias con el medio que las contiene. Estas sustancias pasan de un lugar a otro a través de membranas biológicas, cuya composición y estructura les confiere funciones tan importantes cuan específicas.

Las membranas no son sólo una barrera para la separación de los distintos compartimentos acuosos con composiciones de solutos diferentes, sino que constituyen también una base estructural en donde se encuentran unidas enzimas y sistemas de transporte. Dentro de los componentes que deben transportarse a través de la bicapa lipídica que forma las membranas, se encuentran los iones metálicos —por ejemplo, sodio (Na^+), potasio (K^+), calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}), etcétera—, cuya presencia es primordial en el desarrollo y la regulación de numerosos procesos celulares.



1. Esquema simplificado del funcionamiento de la bomba Ca^{2+}-ATPasa en el transporte activo de Ca^{2+} en el proceso de relajación muscular

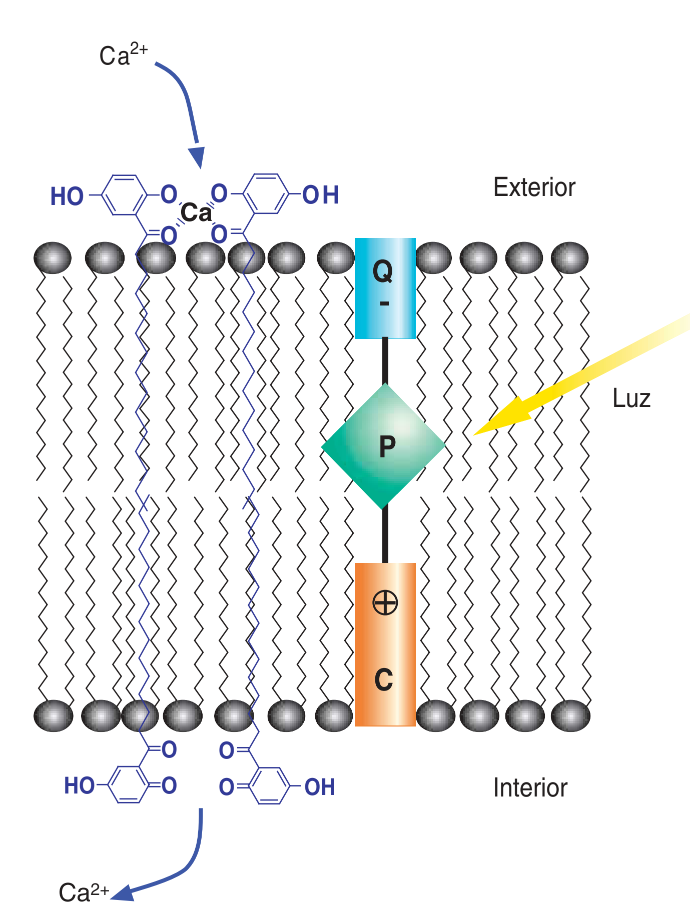
El Ca^{2+} es esencial en la contracción y relajación muscular, el ciclo del ácido cítrico, la visión, la transducción de señales biológicas y la secreción de hormonas, entre otros procesos. Se han descrito numerosas patologías relacionadas con el transporte y la acumulación de ion Ca^{2+} en los fluidos biológicos; por citar algunas: la osteoporosis, la progresión y metástasis de cáncer, las enfermedades cardiovasculares y la esclerosis múltiple.

Una forma de transporte de Ca^{2+} a través de membranas se produce por medio de canales iónicos. Este es un tipo del llamado transporte asistido, en el cual el soluto (aquí el Ca^{2+}) se asocia a un sistema para ser transportado y posteriormente liberado. Se trata de un mecanismo altamente específico para el transporte de un determinado sustrato; se requiere, además, en el caso del paso de iones metálicos a través de membranas, ya que éstas son de baja polaridad en su seno (formado por las colas no polares de los fosfolípidos). Los canales iónicos constituyen un grupo extenso de proteínas que tienen un factor en común: su idoneidad para formar poros que permiten el movimiento de iones a través de las membranas.

Un ejemplo lo constituyen los canales de Ca^{2+} presentes en las células de los tejidos musculares; dichos canales son sensibles a los cambios de potencial eléctrico en la membrana. En el músculo en reposo existe una diferencia de potencial a través del sarcolema (membrana plasmática de las células musculares) de unos 60 milivolt, generado por el desequilibrio iónico.

En el proceso de contracción muscular, en términos simples, un impulso eléctrico procedente del nervio motor llega a la placa motora terminal, o conexión neuromuscular; induce allí una rápida despolarización de la membrana. Esta señal eléctrica se transmite al retículo sarcoplasmático (una especialización del retículo endoplasmático) en donde el Ca^{2+} se encuentra almacenado; produce un aumento de la permeabilidad de la membrana reticular al paso del ion, por medio de los canales sensibles a los cambios de potencial. El rápido aumento de la concentración de Ca^{2+} en el sarcoplasma (fluido intracelular del músculo) provoca la contracción muscular.

En el proceso de relajación muscular, el Ca^{2+} debe transportarse, en contra de un gradiente de concentración, desde el sarcoplasma a través de la membrana al interior del retículo sarcoplasmático; es decir, desde un compartimento hacia otro en donde se encuentra en mayor concentración. Este tipo de transporte es llamado transporte activo; para que se lleve a cabo, hay que suministrar energía. En el transporte pasivo (a favor de un gradiente de concentración), por el contrario, el proceso libera energía. En el caso del



2. Sistema artificial que permite la acumulación de Ca^{2+} en el interior de vesículas mediante la utilización de la energía de la luz

bombeo de Ca^{2+} en la relajación muscular, la energía para el transporte proviene de la hidrólisis de ATP. En efecto, el trifosfato de adenosina es la molécula transportadora de energía química más importante de las células de todas las especies (obsérvese un esquema simplificado del transporte activo de Ca^{2+} en células musculares mediante la bomba Ca^{2+}-ATPasa en la figura 1).

En el continuo esfuerzo para intentar comprender los procesos complejos que ocurren en la célula, se preparan en los laboratorios, el nuestro incluido, sistemas sintéticos que imitan algunos de los procesos naturales (sistemas biomiméticos).

Recientemente hemos publicado nuestros resultados sobre la generación de sistemas artificiales de transporte activo de Ca^{2+} a través de membranas biológicas. Nuestro modelo utiliza energía lumínica en la producción de potencial químico y eléctrico de transmembrana por acumulación de Ca^{2+} en el interior de vesículas en contra de un gradiente de concentración. La bomba artificial de Ca^{2+} (*véase la figura 2*) está formada por una molécula compleja, inserta dentro de la membrana, capaz de generar un estado de separación de cargas eléctricas cuando recibe luz de adecuada longitud de onda.

Este tipo de moléculas (a veces denominadas centros fotosintéticos artificiales porque imitan los pasos iniciales de la fotosíntesis natural) constan de un centro receptor de luz [una porfirina (**P**), de estructura química similar a la clorofila] y otros grupos que cumplen las funciones de dadores y aceptores de electrones [caroteno (**C**) y quinona (**Q**), respectivamente]. Dada esta estructura particular (**C-P-Q**), las moléculas en cuestión almacenan la energía proveniente de la luz en la forma de estado de separación de cargas eléctricas (*figura 2*); la energía retenida puede utilizarse luego para desencadenar reacciones químicas.

Nuestro sistema se complementa con una molécula soluble en la membrana (pero insoluble en el medio acuoso de ambos lados de la misma), que tiene la particularidad de formar un complejo con el Ca^{2+} cuando se encuentra reducida y de liberarlo cuando la misma es oxidada. De este modo, el Ca^{2+} es capturado desde el exterior de la vesícula por medio de dos unidades de la forma hidroquinona (reducida) de la molécula transportadora. El complejo se difunde hacia el lado opuesto de la membrana, donde la misma es oxidada (a quinona) al cederle electrones a la zona cargada positivamente del centro fotosintético artificial. Así el Ca^{2+} es liberado dentro de la vesícula, donde queda almacenado. El ciclo se cierra con la reducción de la molécula transportadora, tomando electrones desde la zona cargada negativamente del centro fotosintético; se halla lista entonces para formar un complejo con otro ion Ca^{2+} y recomenzar un nuevo ciclo del trabajo de transporte.

El desarrollo de estos sistemas artificiales, y otros de similar carácter, que imitan mecanismos básicos de los procesos biológicos, reviste suma importancia. Piénsese en su aplicación como modelos en el estudio de las bases fundamentales de los procesos fisicoquímicos que ocurren en la biología molecular.

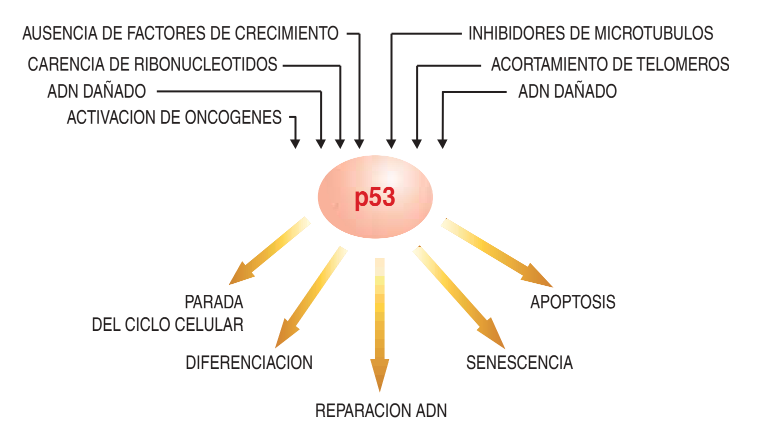
LUIS ALBERTO OTERO
Depto. de Química, Facultad de Ciencias Exactas,
Universidad Nacional de Río Cuarto,
Córdoba, Argentina

Securina

Modulación de las funciones de p53

La transformación de una célula normal en una cancerosa es un proceso paulatino en el que se producen mutaciones que confieren ventajas proliferativas a la célula. Varias son las características que comparten las células cancerosas: independencia de factores de crecimiento exógenos para crecer, falta de respuesta ante señales que bloquean la proliferación, capacidad de inducir la formación de vasos sanguíneos que le aporten oxígeno y nutrientes y la de evitar la muerte celular, entre otras.

Frente a condiciones que pueden causar alteraciones oncogénicas, la célula normal induce el factor de transcripción p53, o siendo más precisos, induce la estabilidad de la proteína p53. Compete a ésta mediar la transactivación y transrepresión de genes diana que pueden provocar parada del ciclo celular, senescencia, diferenciación o muerte celular (*véase la figura 1*).



1. P53 es activado por diversos tipos de estrés. En estas condiciones la proteína p53 se estabiliza y responde de distinta manera en función del contexto celular

La regulación de la actividad de la proteína p53 resulta, pues, determinante para el crecimiento normal de la célula y para la supresión tumoral.

El problema surge cuando la proteína p53 no lleva a cabo su función adecuadamente. Sucede así en la mayoría de los tumores analizados. De éstos, más del 50 % tienen mutada la proteína p53. Resulta, además, que la mayoría de las mutaciones (95 %) se producen en su zona central, responsable de su interacción con el ADN e imprescindible para inducir o reprimir genes diana.

En algunos tumores, sin embargo, no es la proteína p53 la afectada, sino alguna de las implicadas en su estabilización o alguna de las efectoras. En la regulación de la estabilidad de p53 desempeña una función clave la proteína MDM2, que opera como una ubiquitín-ligasa de p53. Le incumbe mediar la ubiquitinación de la proteína p53 y permitir que el proteosoma la reconozca y degrade.

La proteína MDM2, inducida por p53, se ubiquitina a sí misma y regula su propia estabilidad. Pero en la regulación de la función de MDM2 interviene la proteína ARF; ésta bloquea a aquélla en el nucleolo y, de ese modo, impide que ubiquitine a p53.

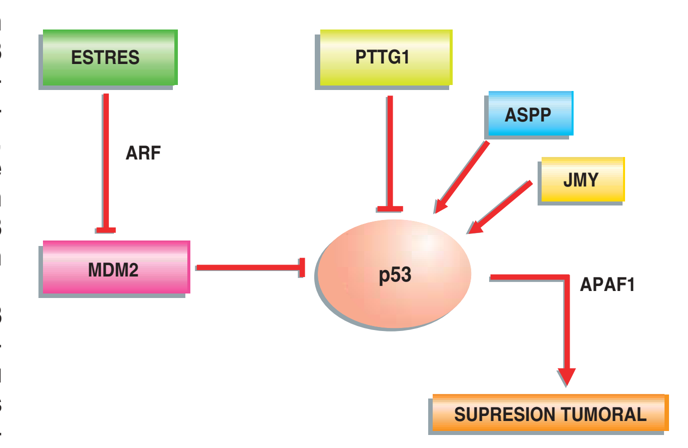
La inhabilitación de MDM2 repercute en la función de la proteína p53. Se han descrito tumores con p53 silvestre que se comportan, sin embargo, como si carecieran de ella. Se debe esa paradoja a que presentan multiplicado (amplificado) el gen *MDM2* y expresan, en consecuencia, niveles altos de proteína MDM2, que impiden la activación de p53. A menudo se observa un efecto parecido en tumores de colon con proteína p53 silvestre, que mantienen inactivado por hipermetilación el gen *ARF*.

Se bloquea también la función de la proteína p53 con la mutación de alguna proteína efectora. Suele ocurrir en melanomas, tumores que se caracterizan por su agresividad y resistencia a la quimioterapia. En estos tumores, el gen *APAF*-1, que codifica una de las proteínas que interviene en la vía de muerte celular inducida por p53, está silenciado por metilación anómala de su promotor.

La proteína p53 puede modular la selección de sus genes diana mediante la interacción directa o indirecta con otras proteínas. Así, la interacción con la proteína JMY, a través de la acetiltransferasa p300/CBP, aumenta la inducción por p53 del gen apoptótico *Bax*, pero apenas afecta la inducción de otros genes, como *p*21, que detienen el ciclo celular. Una regulación de la respuesta apoptótica de p53 por interacción directa la llevan a cabo proteínas de la familia ASPP. La interacción de la proteína p53 con ASPP1 o ASPP2 potencia su relación con promotores diana de genes apoptóticos; por el contrario, la inhibición de la expresión de ASPP bloquea la respuesta apoptótica de p53.

Recientemente, nuestro grupo de investigación ha dado a conocer un nuevo mecanismo de inactivación de la proteína p53 por la proteína PTTG1. Por homología funcional con las proteínas Pds1 y Cut2 de levadura, PTTG1 se ha identificado su naturaleza: se trata de una securina humana. En el ciclo celular, la securina se ocupa de evitar la separación prematura de las cromátidas hermanas. Hasta la etapa de metafase, la securina interacciona con la proteasa separasa, impidiendo que ésta actúe. Una vez los cromosomas están dispuestos en la placa ecuatorial, y listos para su reparto, el proteosoma promueve la ubiquitinación y degradación de la securina; en virtud de ello, se libera la separasa, que proteoliza las cohesinas, proteínas que mantenían unidas las cromátidas hermanas.

La carencia de securina provocaría, pues, inestabilidad cromosómica, que repercutiría en la distribución anómala de cromosomas. Aunque no se conocen tumores que carezcan del gen *PTTG*1, sí abundan los tumores que expresan la proteína securina en cuantía notable. Conocido, además, que la sobreexpresión de securina en células NIH3T3 promueve que éstas adquieran un fenotipo transformante y que inyectadas luego en ratones atímicos den lugar a la formación de



2. Las células tumorales no responden adecuadamente a determinadas situaciones de estrés, debido a mutaciones en los genes inducibles por p53, mutaciones en el propio p53 o a mutaciones o alteraciones en los niveles de las proteínas que modulan sus funciones. Se ha identificado a PTTG1/securina como una nueva proteína moduladora de la actividad de p53

tumores, nos decidimos por analizar el mecanismo de inducción tumoral por sobreexpresión de securina.

De entrada había que determinar los compañeros de viaje de la securina en las diferentes etapas del proceso. Entre las proteínas que interaccionaban con securina se contaba p53. En virtud de esa interacción, se impide que la proteína p53 se una al ADN para transactivar o transreprimir sus promotores diana, como p21 y Bax, que intervienen en la parada del ciclo celular y en la inducción de muerte celular.

La modificación del patrón y de los niveles de expresión de securina repercute en la funcionalidad de p53 e impide que la célula responda adecuadamente a condiciones que favorecen el desarrollo de tumores.

Por otra parte, la presencia de mutaciones de p53 en células tumorales hace que éstas sean resistentes a ciertos agentes quimioterapéuticos. Pero también algunos tumores con p53 normal son resistentes a quimioterapia y son muy agresivos, por estar afectada la ruta apoptótica dependiente de p53. La inhibición de esta ruta por la presencia de niveles altos de securina constituiría otro mecanismo de supervivencia de las células tumorales que portan p53 funcional (*véase la figura 2*). El conocimiento de los niveles de expresión de securina podría ser una herramienta fundamental para escoger o descartar tratamientos quimioterapéuticos contra determinados tumores.

José A. Pintor Toro
y Juan A. Bernal
Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología,
Sevilla

Las charcas de primavera

Una joya geobotánica mediterránea

El medio acuático continental alberga una flora muy especializada, la constituida por hidrófitos, que en su ciclo reproductivo depende de modo fundamental del agua. Por otra parte, en las márgenes de los ecosistemas acuáticos se desarrolla una flora adaptada a períodos de inundación más o menos prolongados aunque de vida esencialmente aérea. Las plantas que son capaces de cerrar su ciclo generativo lo mismo en condiciones sumergidas que emergidas se denominan anfífitos.

No obstante, la mayoría de las plantas que se desarrollan en estos ecotonos marginales sólo se reproducen sexualmente en condiciones emergidas. Se trata, pues, de plantas terrestres acomodadas a soportar períodos de inundación. Sirvan de ejemplo los helófitos, cuyas partes basales están sumergidas continuamente o durante un cierto período, pero cuyas hojas e inflorescencias sobresalen del agua. La vegetación marginal incluye también terófitos, plantas anuales que completan su ciclo biológico en la estación favorable, pero en este caso también sometidas a un medio temporalmente inundado.



Aspecto primaveral de una charca localizada en Howard Ranch, Condado de Sacramento, California

El clima mediterráneo, estacionalmente seco, condiciona la existencia de una serie de ecosistemas excepcionales: los humedales temporales. Estos incluyen las charcas primaverales y los arroyos estacionales. El ritmo del clima mediterráneo explica su recarga en el período húmedo y frío y su desecación en el seco y caluroso. Se conocen estos ecosistemas en California, Chile, Africa del Sur, Australia y, naturalmente, en los países de la cuenca mediterránea.

La vegetación anfibia mediterránea está en buena medida constituida por terófitos y geófitos efímeros e incluye una flora especializada en soportar períodos sucesivos de inundación, desecación y sequía a lo largo del año. Su fenología se encuentra centrada en un breve período que coincide con la desecación del humedal.

El estudio de la composición, estructura y función de estas fitocenosis ha empezado a recibir una atención creciente por parte de grupos científicos de diferentes países que se están reflejando en simposios internacionales en este 2003, Año Internacional del Agua Dulce. Un grupo de investigación de la Universidad Complutense de Madrid ha abordado el estudio ecológico de las comunidades anfibias ibero-mediterráneas. Parte de este equipo se ha integrado a su vez en un proyecto multidisciplinar dirigido por un grupo de la Universidad de California en Davis, que lleva a cabo la clasificación de las charcas primaverales de California.

Las charcas son frecuentes en el occidente de la cuenca mediterránea, donde el clima mediterráneo se extiende por un territorio mayor. Ello explica que la península Ibérica sea un centro de diversidad de la flora y vegetación anfibia efímera, y un territorio adecuado a escala regional donde estudiar sus patrones ecogeográficos.

En la península Ibérica, la flora vascular que caracteriza las charcas primaverales comprende unos 70 taxones. Destacan los que presentan metabolismo CAM o C4 (un proceso de fijación del carbono que comporta la incorporación de un compuesto de cuatro carbonos).

La riqueza ibérica en fitocenosis propias de los humedales fugaces abarca unas 25 comunidades vegetales tipo. Estas pueden reunirse en cuatro grupos fi-

sonómicos: tapices anfibios de isoétidos (hidrófitos que desarrollan hojas lineares cuando están sumergidos y florecen cuando emergen); pastos anuales dominados por gramíneas; comunidades herbáceas caracterizadas por dicotiledóneas de talla media, y comunidades herbáceas de dicotiledóneas de talla pequeña.

Esos tipos de vegetación son comunes en la mitad mediterránea occidental de la península, constituida por una litología silícea, mientras que en su mitad mediterránea oriental, de naturaleza calcárea, el número de comunidades de este tipo disminuye, desapareciendo, por ejemplo, algunos de los pastos anuales.

Dentro del ecosistema charca, las comunidades vegetales se distribuyen en bandas a lo largo del gradiente de inundación. Si el anegamiento es prolongado, pueden desarrollarse, en el centro de la charca, comunidades helofíticas de talla media.

La flora de las charcas primaverales de California comparte un buen número de géneros con la de la cuenca mediterránea. Dentro de ellas se advierten numerosos ejemplos de pares de especies vicariantes que adoptan posiciones similares en la hidroserie (*Elatine californica-Elatine macropoda*, *Eryngium vaseyi-Eryngium corniculatum*, *Isoetes orcuttii-Isoetes velatum*, etcétera). Además, California aporta una flora endémica importante en especies de los géneros: *Plagiobothrys*, *Downingia*, *Lasthenia*, *Navarretia*, etc.

Los grupos fisonómicos de las comunidades californianas encajan dentro de los descritos del mediterráneo, aunque aquéllas presentan una mayor riqueza en comunidades herbáceas dicotiledóneas de talla media. Lo mismo que sucedía en el Mediterráneo, estas comunidades vegetales presentan en California su mayor diversidad sobre suelos pobres en bases.

El factor climático constituye, pues, el factor primario que condiciona la existencia de las charcas de primavera y sus fitocenosis. La distribución de estas comunidades depende del carácter químico del suelo, alcanzando su mayor diversidad sobre suelos pobres en bases. Por último, el período de inundación determina la distribución espacial de las comunidades de la charca.

JOSÉ ANTONIO MOLINA
Dpto. de Biología Vegetal II, Facultad de Farmacia
Universidad Complutense de Madrid

Extremidades

Desarrollo próximo-distal

Pese a las evidentes diferencias en cuanto al número y morfología de extremidades, los animales comparten muchos genes y procesos implicados en el desarrollo de las mismas.

Durante su desarrollo, cada extremidad tiene que construir independientemente un eje próximo-distal (PD), desde el tronco hasta la punta. A lo largo de este eje se forman las distintas regiones de la extremidad; por ejemplo el brazo, antebrazo y mano. En los artrópodos, tales regiones reciben el nombre de segmentos. En cualquier caso, cada una de estas partes presenta su propia identidad a lo largo del eje PD: un tamaño, morfología y órganos asociados (músculos, órganos sensoriales, etc.) característicos.

Los responsables de asignar identidades a las células de las extremidades son los genes *PD*. Inicialmente, los primordios de las extremidades constan de unas pocas células indiferenciadas. Conforme el desarrollo avanza, los primordios crecen. Los genes *PD* se van activando sucesivamente en regiones precisas, confiriéndoles una identidad distintiva, hasta completar todas las partes de la extremidad. ¿Cuál es el mecanismo de activación de los genes *PD*? ¿Cómo se inician y se restringen sus expresiones para darles unos límites proximal y distal definidos?

En el caso de la mosca *Drosophila melanogaster*, el primordio de cada pata es un disco de células que al final del desarrollo se despliega, a la manera de una antena de radio, para constituir la pata. En el disco, las regiones PD forman una suerte de anillos concéntricos; la periferia del disco dará lugar a los segmentos proximales y, el centro, a los segmentos distales. Así, por ejemplo, el gen *Distal-less* (*Dll*) se activa en un circulo central, que originará la mitad distal de la pata, mientras que *Homothorax* (*Hth*) se expresa en un anillo alrededor de *Dll* en las células que formarán los segmentos proximales.

A medida que el disco crece por proliferación celular, empiezan a expresarse nuevos genes en círculos o anillos, que subdividen el disco en más territorios hasta lograr todas las identidades necesarias.

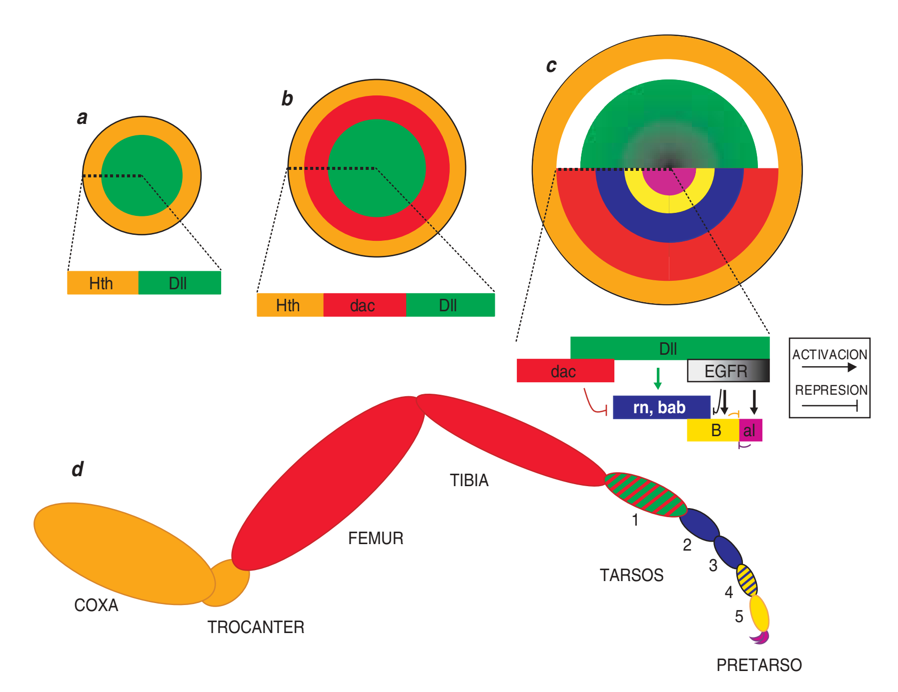
Al final del desarrollo, los genes *PD* conocidos (aproximadamente una decena) se hallan expresados en dominios circulares o anulares restringidos. En su conjunto, cubren el disco entero. Cada segmento expresa una combinación única de genes *PD*, que le confiere su identidad.

Se sabía que, en el caso de *Drosophila*, había dos genes que desempeñaban una función importante en el desarrollo de la pata. Los genes en cuestión eran *wingless* (*wg*) y *decapentaplegic* (*dpp*), homólogos de los genes de vertebrados *Wnt* y *BMP4* respectivamente. El primer modelo de desarrollo PD se basó en las proteínas de señalización celular codificadas por *wg* y *dpp*.

Este modelo atribuía a *wg* y *dpp* la arquitectura del eje PD. Sus patrones de expresión se superponen en el centro del disco en desarrollo. En dicho centro funcionarían como un elemento organizador, gracias a la difusión combinada a larga distancia de las proteínas wg y dpp, que controlan la expresión de los genes *PD*.

Se demostró que el gen *Dll* se expresaba en respuesta a altas concentraciones de proteínas wg y dpp, mientras que el gen *dachshund* (*dac*), que se expresa en un amplio anillo medial, se activaba sólo en concentraciones intermedias de la señal.

El modelo supuso un importante avance. Muchos investigadores dieron por supuesto que podría explicar la modulación de la expresión de todos los genes *PD*:



Esquema del desarrollo próximo-distal de las patas de Drosophila. *Los discos representan los primordios de las patas. Los genes* PD *que se expresan en ellos en sucesivos estadios del desarrollo* (A-C), *desde la parte proximal (periferia del disco) hacia la distal (centro del disco). Debajo de cada disco se muestran las posiciones relativas de los dominios de expresión de dichos genes a lo largo de una sección transversal por la línea de puntos, con la parte proximal a la izquierda y el extremo distal a la derecha. En el disco más tardío* (C)*, los genes que se expresan en dominios solapados se han representado en distintas mitades del disco; en el esquema correspondiente a la sección transversal se indican las relaciones reguladoras entre los genes. Los dominios de los distintos genes o combinaciones de éstos determinan la identidad de regiones definidas de la pata adulta* (D)*, representada como en las secciones, proximal a la izquierda y distal a la derecha*

la célula calcularía su posición en el eje PD en función de su distancia al centro del disco, ya que la concentración de proteínas wg y dpp a que está expuesta determinaría qué genes *PD* deben allí activarse.

Pese a su sencillez y elegancia, el modelo adolece, sin embargo, de diversas limitaciones y no puede explicar el desarrollo PD en su totalidad. En particular, es difícil admitir que basten ligeras diferencias en la concentración de dos proteínas para originar diez o más destinos diferentes con limites nítidos. Además, los discos crecen sin cesar durante el desarrollo; por tanto, las distancias al centro no permanecen constantes.

Así las cosas, de nuestras investigaciones se desprendía un modelo más completo del establecimiento de identidades PD. De acuerdo con el mismo, *Dll* y *dac* son los dos genes *PD* que intervienen primero, junto con *Hth*. Empiezan a expresarse cuando el disco es todavía muy pequeño. El resto de genes *PD* se expresa en la segunda mitad del desarrollo.

Mediante técnicas genéticas, mostramos que el privar de *wg* y *dpp* a los discos en este segundo período no impide la expresión del resto de los genes *PD*. En consecuencia, éstos deben ser controlados por otros mecanismos. La última labor de los genes *wg* y *dpp* es activar la expresión de la proteína Vein (Vn) en ciertas células del centro del disco. Dicha proteína actúa de ligando activador del receptor del factor de crecimiento epidérmico (EFGR), que opera a través de la ruta Ras de señalización celular.

A partir de ahí, se activa el resto de los genes *PD* en sus dominios correspondientes, a través de señales locales. Por ejemplo, los genes *rotund* y *bric-a-brac*, que controlan el desarrollo de los tarsos (los segmentos inmediatamente anteriores a la punta), son activados por *Dll*; su expresión no es, sin embargo, idéntica a *Dll*, pues son reprimidos por *dac* proximalmente y por la señal de EGFR distalmente, resultando en un anillo incluido en el interior del dominio de *Dll*.

De forma simultánea, una señal intensa de EGFR induce, en el centro del disco, la expresión de genes del pretarso, como *aristaless* (*al*), en el extremo distal de la pata. Una señal más moderada alrededor de *al* induce la expresión de genes determinantes de los tarsos distales, como *Bar* (*B*).

Puesto que los genes *al* y *B* se excluyen entre sí, se origina una frontera nítida entre ambos dominios. Por tanto, los nuevos destinos *PD* se generan de forma gradual, como resultado de genes que ya se habían expresado en la célula correspondiente o en respuesta a productos codificados en células vecinas, pero no en respuesta ante ningún organizador global.

Además de su evidente interés para el conocimiento de la formación de un patrón complejo en un órgano animal, de interés principal en biología de desarrollo y en evolución, estos resultados repercuten también en la comprensión de la biología humana. Los vertebrados poseen versiones de los genes *Hth*, *dac* y *Dll* —a saber, *Meis1*, *Dac* y *Dlx*, respectivamente— y de los genes *al* y *B* —*Al-4* y *BarX1*—, todos los cuales se expresan en las extremidades en posiciones equivalentes a las que ocupan en *Drosophila*. Asimismo, el desarrollo de las extremidades de los vertebrados depende de una señal desde la punta de FGF, otra proteína secretada que opera a través de la ruta Ras, al igual que Vn.

Por consiguiente, es probable que los resultados que hemos obtenido en *Drosophila* puedan aplicarse al desarrollo de las extremidades en vertebrados y, por tanto, al análisis de las malformaciones congénitas que los afectan.

MÁXIMO IBO GALINDO y JUAN PABLO COUSO
Facultad de Ciencias Biológicas
Universidad de Sussex (U.K.)

Autores: Josep-Maria Gili y Sergio Rossi

La vida en los polos: el pingüino emperador



1. Durante las primeras tres semanas de vida, es la hembra quien alimenta al pollito. Después se alternan los dos progenitores. Con todo, quien pasa más tiempo con el pollo es la hembra

Con sus 125 cm de altura, el emperador es el mayor de los pingüinos. Tiene de color negro la cresta, las mejillas y el cuello; de un gris azulado característico, el resto de la cabeza. Detrás de las orejas poseen los adultos una mancha amarillo-anaranjada, que es blanca en los individuos inmaduros.

Estas aves de pico largo, poderoso y recurvado hacia abajo ponen un huevo por pareja, una vez al año. La puesta empieza en mayo, cuando machos y hembras se concentran en colonias. El macho ayuda durante la puesta. El huevo no debe tocar el suelo helado, por lo que el macho lo recoge y lo deja caer sobre sus patas cubriéndolo con la parte baja de la tripa. A partir de ese momento comienza un período de unos dos meses en el que los machos no pueden abandonar nunca el huevo, incubándolo sin alimentarse durante ese tiempo. La hembra parte. Deja al macho solo (en compañía de todos los demás machos de la pingüinera).

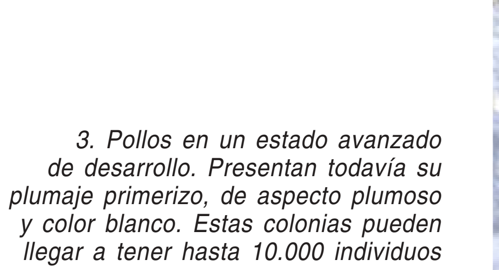
Se va la madre porque ha de alimentarse cuanto pueda. Cuando nazca el pollito, le compete a ella procurarle el sustento. Sin embargo, al romper el huevo, el pollito recibe del macho el primer bocado: regurgita una papilla que guarda durante meses en su buche. A lo largo de los cuatro meses siguientes se produce un constante ir y venir de los adultos entre el mar, donde se alimentan, y el "nido", donde aguarda el polluelo.

Los padres descubren a su pequeño entre la multitud por el silbido. Según parece, cada pollo grita con una frecuencia diferente, no obstante los chillidos que se dirían uniformes. Si el progenitor no vuelve, víctima de una orca o de una foca leopardo, el polluelo queda expuesto a una muerte segura. Por inanición o por ataque de págalos, aves muy agresivas que nunca se atreverían con los adultos.

Coincide la alimentación abundante del polluelo con la primavera austral; pierden peso en invierno. El cuidado parental llega hasta los 12-14 meses de vida. Para entonces, dejados ya a sus expensas, han cambiado su plumaje de juvenil al de adulto. Pero les quedan todavía cuatro años hasta llegar a la madurez sexual. Suelen vivir de 10 a 11 años.



2. El pingüino emperador (Aptenodytes forsteri) *vive todo el año asociado a las fuertes fluctuaciones climáticas de la Antártida. A diferencia de otras especies, no emigra en invierno*



3. Pollos en un estado avanzado de desarrollo. Presentan todavía su plumaje primerizo, de aspecto plumoso y color blanco. Estas colonias pueden llegar a tener hasta 10.000 individuos



1. UNA CONFIGURACION ADAPTATIVA de antenas concentra las ondas radioeléctricas en una "célula personal" que rodea a cada usuario del servicio de telefonía móvil. La técnica de las antenas inteligentes aumenta el alcance de las redes inalámbricas de voz y datos, y permite que varios abonados situados en la misma zona de cobertura se comuniquen en la misma frecuencia.

Antenas adaptables

Las configuraciones adaptativas de antenas convierten las comunicaciones inalámbricas entre los teléfonos móviles en auténticas conexiones por hilos virtuales

Martin Cooper

Nos encontramos inmersos en un invisible océano de ondas electromagnéticas. Proceden de multitud de fuentes: antenas de radiodifusión, estaciones de telefonía celular, transmisores de la policía y otros servicios civiles o militares. Aunque estas radiaciones no nos ocasionen quizá perjuicio físico alguno, sí pueden mermar notablemente nuestra capacidad de recibir y transmitir información. El exceso de energía radioeléctrica contamina el entorno porque perturba e interfiere las comunicaciones útiles. Así como hay que alzar la voz en los ambientes ruidosos, las señales de radio se han de amplificar para que destaquen sobre el ruido de fondo electromagnético. Y cuanto más proliferan las comunicaciones electrónicas, más crece el alboroto de las interferencias radioeléctricas.

El problema puede solucionarse mediante un nuevo tipo de antenas de radio que reduce muchísimo las interferencias artificiales. En vez de radiar innecesariamente en todas las direcciones la energía asociada a una comunicación personal (una llamada de teléfono móvil, pongamos por caso), siguen la posición de los usuarios a medida que se desplazan y les envían directamente las señales de radio que les estén destinadas. Se eleva así al máximo la intensidad de señal recibida por el usuario del teléfono al tiempo que las interferencias de otros usuarios se reducen al mínimo. Es como si las antenas tendiesen hilos virtuales que las conectasen con cada teléfono móvil.

Suele llamarse a estos sistemas, en general, antenas inteligentes, pero las más inteligentes reciben una denominación específica: configuraciones adaptativas de antenas. Fui uno de los fundadores, en 1992, de ArrayComm, una empresa domiciliada en San José, California, dedicada al desarrollo de configuraciones adaptativas de antenas que se puedan incorporar a redes inalámbricas, tanto nuevas como ya existentes. Nuestras configuraciones comprenden un máximo de doce antenas y un potente procesador digital que combina y manipula las señales entrantes y salientes. Esta técnica, también aplicada por Lucent Technologies, Nortel Networks y otras firmas, promete reducir los costes y mejorar la calidad de las comunicaciones inalámbricas. Se cuentan ya por millones los usuarios de telefonía móvil que disfrutan de las ventajas de las configuraciones adaptativas. Las antenas inteligentes podrían también convertirse en piezas clave de la Internet inalámbrica, dada su gran aptitud para transmitir y recibir grandes volúmenes de datos.

Principios físicos de las antenas

Para comprender el funcionamiento de las antenas inteligentes, conviene empezar por describir las ordinarias. Una antena de radio emisora convierte las corrientes y tensiones eléctricas creadas por un transmisor en ondas electromagnéticas que se radian al espacio. También será una antena la que capte tales ondas y las reconvierta en corrientes y tensiones que pueda procesar el receptor. El tipo más sencillo y más común de antena de radio es el dipolo, un simple conductor metálico de longitud muy precisa que radia energía en todas las direcciones (*véase el recuadro* “Generación de un haz de radiación”). Las ondas radioeléctricas se van atenuando a medida que se propagan por el espacio y son absorbidas por los obstáculos que encuentran: el aire, los árboles o los edificios.

Las estaciones comerciales de radio y de televisión tienen que recibirse en lugares muy dispersos, y por tanto es lógico que emitan señales en todas las direcciones. Pero la llamada de un teléfono móvil va dirigida por lo normal a un solo usuario nada más. Los

KENN BROWN

abonados de una red celular de telefonía móvil se comunican con la estación base más cercana, donde hay una serie de antenas que manejan todas las señales inalámbricas del servicio en la zona circundante (la "célula" a la que se refiere el epíteto de "celular"). Las estaciones base están situadas de manera que la reunión de sus respectivas células componga la zona total de cobertura del servicio de telefonía móvil. Así, cuando en el curso de una llamada el usuario se desplaza de una célula a otra, el sistema traspasa automáticamente la llamada a la estación base que corresponda a la nueva célula. Pero sería mucho mejor concentrar la energía radioeléctrica en cada usuario, a la manera en que un proyector concentra los rayos de luz en un haz. Un haz radioeléctrico tendrá un alcance mucho mayor que una señal de idéntica potencia radiada omnidireccionalmente. Y la interferencia se reducirá al existir una separación espacial entre los haces que transmite la estación base celular a los distintos usuarios.

Los reflectores pueden concentrar las ondas de radio en un haz, pero son voluminosos y caros. Por ello se han ideado artificios para crear haces de radiación sin necesidad de reflectores. Montemos dos antenas lado con lado, separadas media longitud de onda de la señal de radio; el diagrama de la energía que radiará esta sencilla configuración presentará, visto desde arriba, la forma de la cifra ocho. Las ondas radioeléctricas tienen su máxima propagación en las dos direcciones perpendiculares a la configuración (es decir, a la línea que une las antenas), ya que un usuario situado en esas direcciones recibirá exactamente a la vez las señales de ambas antenas: dicho de otro modo, las dos señales estarán en fase. Cuando dos señales idénticas están en fase, su combinación constituye una señal de intensidad doble a la de cualquiera de ellas. Sin embargo, si el usuario se sitúa en las direcciones paralelas a la configuración de antenas, las dos señales recibidas estarán desfasadas en 180 grados, y entonces los máximos de amplitud de la señal procedente de una antena llegarán al mismo tiempo que los mínimos de la otra señal, con lo que las dos señales se anularán entre sí. En esos puntos se crea un nulo, una zona en la que no puede detectarse la señal.

El haz de radiación que genera una configuración de dos antenas, bastante ancho, se extiende en dos direcciones opuestas. Al añadir antenas se va estrechando; la configuración resultante, una "antena de elementos en fase", se utiliza para dirigir haces de radar desde la Segunda Guerra Mundial. Además del estrechamiento del haz, también se producen los llamados lóbulos de radiación laterales, pequeños haces situados a uno y otro lado del haz principal. Según la dirección en que se coloque el usuario respecto de la configuración de antenas, la señal puede ser más intensa que la procedente de una antena individual (caso de "ganancia") o más débil debido a los efectos de anulación ("rechazo").

Resumen/*Antenas inteligentes*

- En una red inalámbrica resulta útil emplear una configuración de múltiples antenas en cada estación base celular.
- Las configuraciones adaptativas incluyen potentes procesadores que modifican las señales de antena para intensificar la comunicación con un usuario, al tiempo que se reducen al mínimo las interferencias de los demás usuarios.

Apuntar el haz

De nada sirven los haces radioeléctricos si no es posible dirigirlos hacia un destino deseado. La solución obvia, se diría, consiste en girar físicamente la antena. Método engorroso y caro, es mucho más fácil orientar los haces por medios electrónicos. En la técnica de conmutación de haces, la configuración de antenas crea un grupo de haces de radiación que se solapan para cubrir toda una zona circundante (*véase el recuadro* "Conmutación de haces"). Cuando un abonado del servicio de telefonía móvil llama, el radiorreceptor de la estación base determina por qué haz llega con mayor intensidad su señal; seguidamente "responde" utilizando ese mismo haz. Si el abonado se traslada desde el haz original hasta otro adyacente, el sistema de control radioeléctrico conmutará a ese nuevo haz, que se empleará tanto para recibir como para transmitir.

La conmutación de haces no da, sin embargo, buenos resultados en el mundo real de las comunicaciones inalámbricas. Para que la transmisión sea óptima el usuario tiene que situarse en el centro del haz. Si se aparta de esa posición central la señal se atenúa, como sucede con la luz proyectada por un foco si nos salimos de la dirección a la que apunta. Cuando el usuario se aproxime al borde exterior del haz, la intensidad de la señal bajará rápidamente antes de que el sistema conmute al haz adyacente. Y ¿qué pasará si otro usuario intenta utilizar ese mismo radiocanal desde una dirección diferente? Si está en un nulo no habrá interferencia, pero si se situase en el centro de un lóbulo la segunda señal podría muy bien anular o distorsionar la primera.

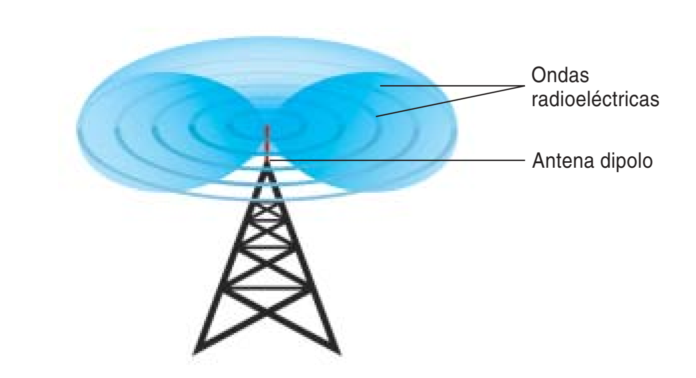
Los sistemas de conmutación de haces tienen además que superar otra dificultad: la trayectoria irregular —raramente en línea recta— que siguen las señales radioeléctricas en la mayoría de los entornos. La señal recibida en un teléfono móvil suele ser una combinación de las reflexiones en objetos naturales y artificiales, en casas, montañas, vehículos y árboles. Y estas reflexiones cambian continuamente, sobre todo las producidas por los vehículos grandes (trenes, autobuses). Este fenómeno, la propagación multitrayecto, afecta también a las señales que el teléfono móvil envía a la estación base. Si el usuario de una configuración de conmutación de haces se acerca al borde de un haz, la señal que transmita podría rebotar hacia el haz adyacente antes de alcanzar la configuración de conmutación de haces. En tal caso, la configuración transmitiría hacia un haz que no es el correcto y el usuario podría perder enteramente la señal de retorno.

GENERACION DE UN HAZ DE RADIACION

LA TECNICA DE LAS ANTENAS INTELIGENTES se basa en la capacidad de conformar los diagramas de radiación que definen la cobertura. Al enfocar las ondas a los usuarios individuales de la telefonía móvil, las antenas inteligentes amplían el alcance de los sistemas y reducen al mínimo la interferencia.

ANTENA ORDINARIA

La antena más sencilla es el dipolo, varilla metálica que radia energía en todas las direcciones. Las ondas radioeléctricas se atenúan a medida que se propagan por el espacio y sufren absorción por obstáculos. Estas antenas son idóneas para la difusión de emisiones de radio y televisión, que han de llegar a audiencias geográficamente dispersas.

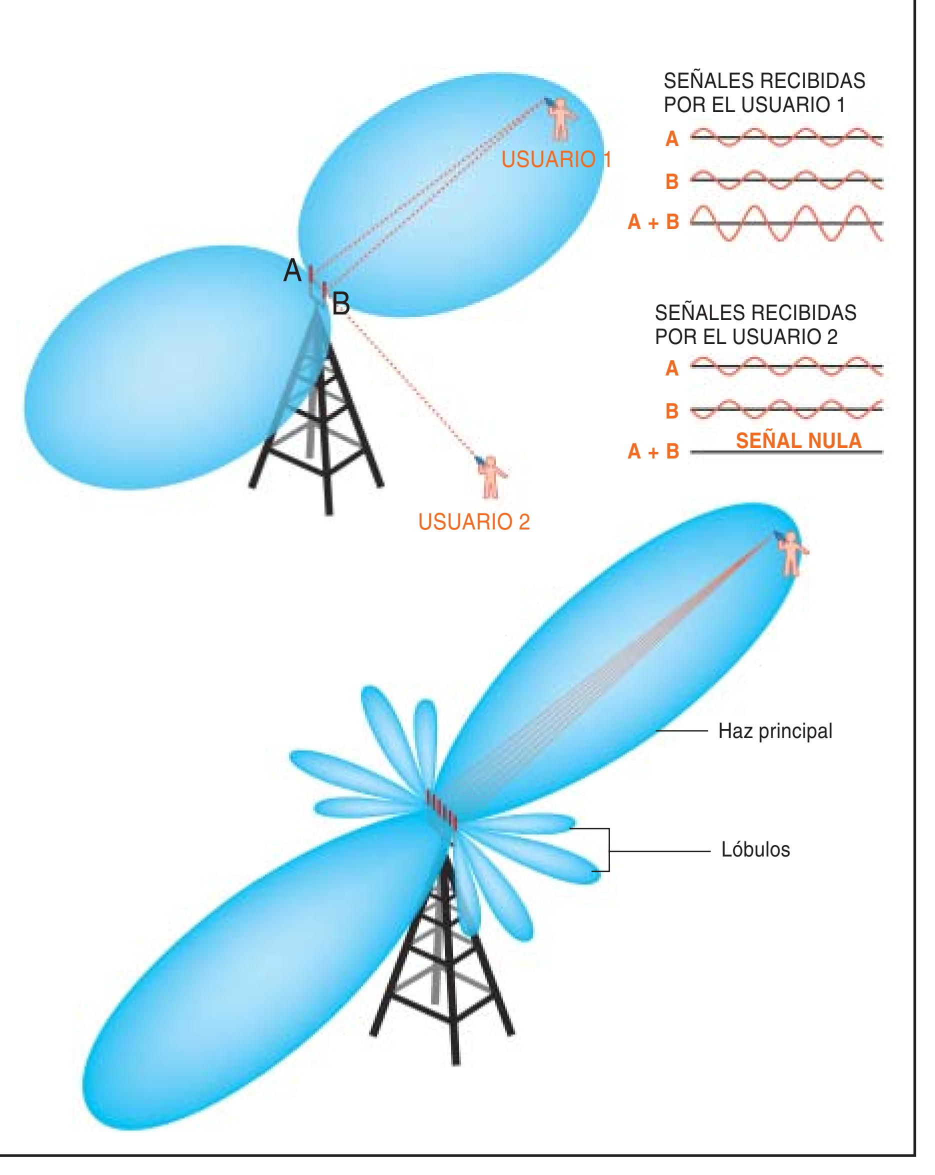


CONFIGURACION DE DOS ANTENAS

Sean ahora dos antenas, A y B, dispuestas lado con lado y separadas entre sí una distancia de media longitud de onda de la señal de radio que ambas emiten (las longitudes de onda de los sistemas celulares caen entre los 12 y los 37 centímetros). El usuario de un teléfono móvil situado perpendicularmente a la configuración de antenas (usuario 1) recibe ambas señales al mismo tiempo (en fase), con lo que su intensidad se duplica. Pero el que está alineado con la configuración (usuario 2) recibe la señal de la antena B medio ciclo antes que la señal de la antena A. Las dos señales le llegan en oposición de fase y se anulan entre sí. De este modo, la configuración de dos antenas crea zonas, llamadas nulos, donde no puede recibirse la señal.

CONFIGURACION DE SEIS ANTENAS

Una configuración de seis antenas genera un haz de radiación más estrecho y de mayor alcance que el producido por la configuración de dos antenas. Crea además otros haces más pequeños, los "lóbulos laterales".



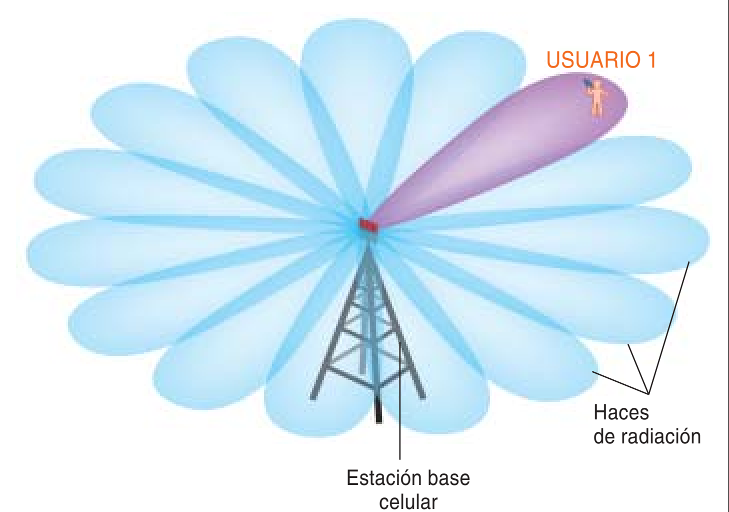
SARA CHEN

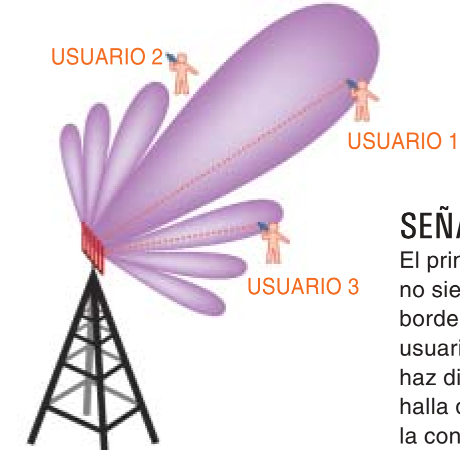
CONMUTACION DE HACES

UNA ANTENA INTELIGENTE ha de ser capaz de dirigir sus haces de radiación a los destinos deseados. Un modo de conseguirlo es la llamada conmutación de haces, técnica que se incorpora con facilidad a las redes inalámbricas, aunque adolece de graves inconvenientes.

SELECCION DE HAZ

En un sistema de conmutación de haces, la configuración de antenas genera haces de radiación que se solapan de manera que cubran entre todas la zona circundante (*derecha*). Cuando un usuario hace una llamada con el teléfono móvil, el radiorreceptor de la estación base determina cuál es el haz mejor alineado con la señal que emite. La configuración transmitirá por ese mismo haz (*en púrpura*) las señales de respuesta al usuario.





SEÑALES MIXTAS

El principal inconveniente de la conmutación de haces es que la configuración no siempre apunta el haz directamente al usuario (*izquierda*). Al acercarse al borde del haz el usuario 1, la intensidad de la señal bajará rápidamente. Otros usuarios podrán comunicarse en la misma frecuencia (aunque utilizando un haz diferente) siempre que estén en un nulo (usuario 2). Pero si el usuario se halla dentro de un lóbulo (caso del usuario 3), las señales que intercambie con la configuración interferirán las del usuario 1.

SARA CHEN

Los sistemas de conmutación de haces resultan inadecuados para las aplicaciones prácticas. Una configuración de antenas inteligente deberá apuntar el haz radioeléctrico directamente al usuario móvil, en vez de elegir un haz que le caiga más o menos próximo. La configuración ideal tendría que conformar el haz de radiación de suerte tal, que haga mínima la interferencia de otros usuarios que se estén comunicando por el mismo canal de frecuencias. Y debería adaptarse con rapidez a los desplazamientos del usuario y a los reflejos cambiantes. Todo esto nos lleva a las configuraciones adaptativas de antenas.

El efecto “sala de banquete”

La clave de la inteligencia de una configuración adaptativa reside en el procesamiento de la información que reciben las antenas que la componen. Se puede hallar una buena comparación en la forma en que el cerebro procesa la información acústica procedente de los oídos. Una persona con audición normal localiza el origen de un sonido aun con los ojos cerrados. Los repliegues curvos del oído externo producen diferentes resonancias según sea la dirección angular del sonido recibido. A menos que la fuente sonora esté situada en el plano vertical de simetría del cuerpo (justo delante o detrás, justo arriba o abajo), el sonido llegará a un oído antes que a otro y las dos señales se desfasarán. El cerebro recibe esa información y rápidamente determina la posición de la fuente.

Por si fuera poco, salvo que se padezcan problemas de audición, se pueden percibir sonidos bastante débiles —una conversación interesante, por ejemplo— en medio de un fuerte ruido ambiente; es el “efecto sala de banquete”. Se ha demostrado que la capacidad de concentrarse en un sonido concreto depende en parte de que pueda localizarse su origen. Se realizaron unas pruebas sobre la claridad con que puede oírse una señal en un ambiente ruidoso; demostraron que los sujetos que prestaban atención con ambos oídos percibían sonidos mucho más débiles que quienes escuchaban con un solo oído. Una vez determinada la posición de la fuente acústica, el cerebro puede concentrarse en el sonido y rechazar los ruidos indeseados que provienen de otras direcciones.

De manera similar, una configuración adaptativa de antenas puede localizar la fuente de una señal radioeléctrica y amplificarla selectivamente, al tiempo que anula las señales que compiten con ella. El cerebro de la configuración es un procesador digital que maneja las señales que llegan por los conductores de las an-

tenas. Una configuración adaptativa ordinaria comprende de cuatro a doce antenas; por mor de sencillez, consideraremos una configuración de dos antenas, separadas entre sí una distancia igual a media longitud de onda de la señal radioeléctrica. En una configuración ordinaria, las señales recibidas por las dos antenas se suman sin más, pero si la configuración es adaptativa, las dos señales irán a parar al procesador adjunto, que realizará con ellas los cálculos matemáticos que sean precisos.

Supongamos, a modo de ejemplo, que la configuración tiene una alineación norte-sur y que la señal de un usuario telefónico celular llega por el este (*véase el recuadro* "Configuraciones adaptativas de antenas"). El procesador puede determinar enseguida la dirección de la señal: puesto que las ondas llegan al mismo tiempo (en fase) a las dos antenas, proceden de una dirección perpendicular a la configuración. Para que la recepción sea máxima el procesador suma las dos señales, con lo que la intensidad total se duplica. Cuando responde al usuario, la configuración transmite señales idénticas desde ambas antenas.

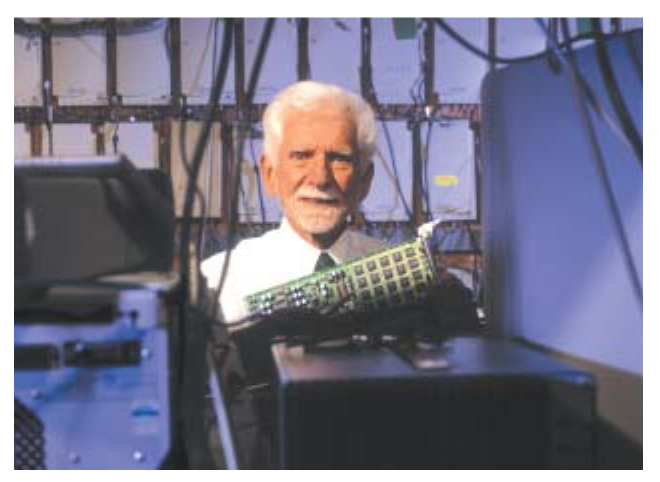
Envíe otro usuario celular una señal desde el sur. Las ondas que capte la antena norte estarán desfasadas 180 grados respecto de las que incidan en la antena sur; el procesador sabrá que la señal viene de una dirección paralela a la configuración. Por lo tanto, *sustraerá* una señal de la otra; es decir, invertirá la señal de la antena norte (o de la sur), tornando en mínimos los máximos de la onda, y viceversa; sumará esta imagen invertida a la señal que procede de la antena sur (o norte). También ahora se duplica la intensidad de la señal. Cuando la configuración responde al usuario móvil, el procesador envía una señal desfasada a una de las antenas, lo que genera un haz de radiación que va de norte a sur.

Adviértase en ambos ejemplos que el haz de radiación generado para un usuario de la telefonía móvil no llega a ningún otro. Dos usuarios podrían estar comunicando con la configuración adaptativa al mismo tiempo y en el mismo canal de frecuencia, pero sus señales no se interferirían. El procesador de la configuración puede crear haces de radiación que apunten también a otras direcciones; para ello ejecutará operaciones matemáticas más complejas con las señales de las dos antenas. La transmisión y recepción selectiva se reduce, pues, a resolver una serie de ecuaciones simultáneas. Para dirigir los haces a usuarios en movimiento, el procesador debe resolver una y otra vez las ecuaciones con la información, constantemente actualizada, que le suministre la configuración de antenas.

Si se añaden antenas a la configuración adaptativa, la localización será más precisa, y mayor la ganancia de la señal. Una configuración de 12 antenas podrá escuchar señales doce veces más débiles que las perceptibles por una sola antena; además, transmitirá con intensidad 12 veces mayor y mucho más directamente. El procesador jugará con las señales de las antenas para crear formas de haz que aseguren la mayor ganancia posible a la señal deseada y el máximo rechazo de las demás señales que ocupen la misma frecuencia.

El autor

MARTIN COOPER, titulado en ingeniería eléctrica por el Instituto de Tecnología de Illinois, debe su fama a la invención del teléfono móvil celular. En 1973, siendo vicepresidente y jefe de división de Motorola, llamó con un prototipo de teléfono móvil a un rival de los laboratorios Bell de AT&T desde la calle, en Manhattan. Diez años después, Motorola ponía a la venta el primer teléfono móvil celular, el Dyna TAC 8000X, que pesaba casi un kilogramo y costaba 4000 dólares. Durante sus 29 años en Motorola, Cooper tuvo a su cargo los dispositivos buscapersonas y la telefonía celular. Al dejar la empresa en 1983, creó Cellular Business Systems, firma dominante en la facturación celular; tras venderla, fue cofundador en 1992 de ArrayComm, en San José, California, hoy líder mundial de las antenas inteligentes.



ANDY FREEBERG

2. A MARTIN COOPER se le reconoce generalmente como el padre de la telefonía móvil.

Puesto que la velocidad del procesador le permite realizar esta función muchas veces por segundo, la configuración reajustará continuamente su haz de radiación a medida que el usuario se desplaza a través de la zona de cobertura. El sistema está diseñado de manera que las reflexiones parásitas de la señal del usuario en vehículos o edificaciones no provoquen cambios bruscos en la dirección del haz. La configuración adaptativa va siguiendo su trayectoria; de esa manera estará en condiciones de evaluar la verosimilitud de movimientos futuros y de descartar informaciones erróneas que indiquen supuestos cambios de posición repentinos.

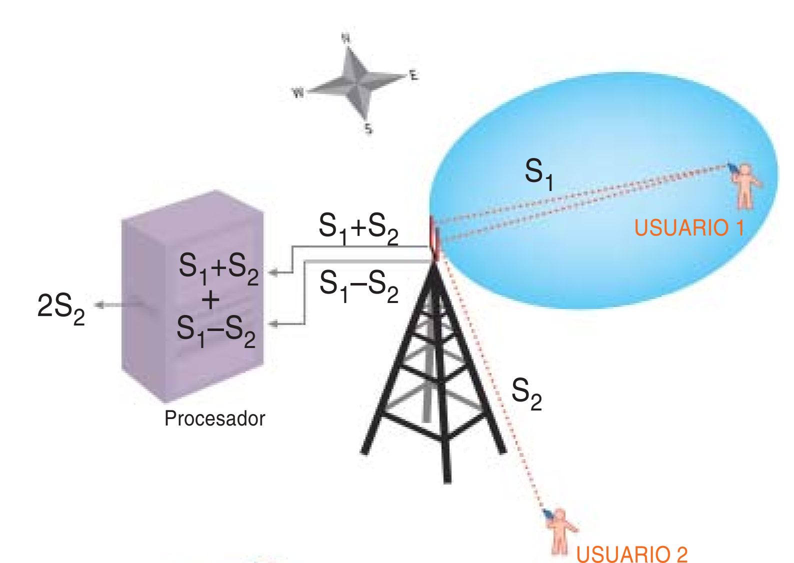
Eso no es todo: las configuraciones adaptativas más avanzadas pueden aprovechar la propagación multitrayecto para enfocar todavía mejor las señales de radio. Dichas configuraciones incorporan procesadores de una potencia tal, que les permiten procesar la información de todas las señales reflejadas que rebotan a lo largo de los distintos trayectos entre el teléfono celular y la configuración adaptativa. Al incluir las reflexiones por multitrayecto en las ecuaciones matemáticas, el procesador extrapola no sólo la dirección de la señal, sino también la posición exacta del usuario celular de que se trate. En un ambiente urbano, donde

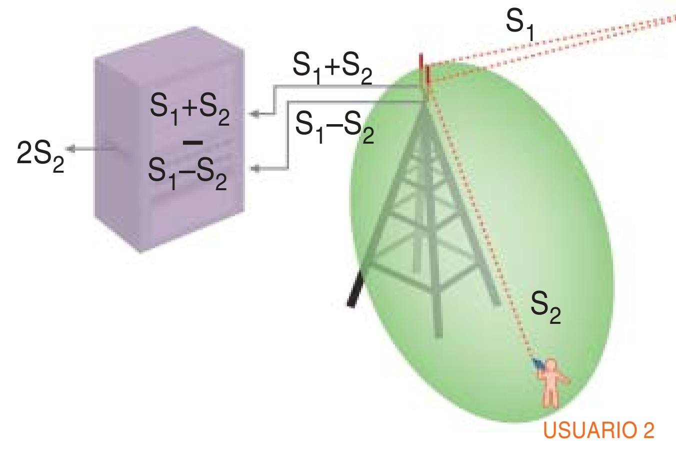
CONFIGURACIONES ADAPTATIVAS DE ANTENAS

LAS ANTENAS "más inteligentes" utilizan procesadores digitales para el tratamiento de las señales entrantes y salientes. Estos sistemas, las "configuraciones adaptativas de antenas", favorecen la transmisión a un usuario y la recepción de las señales de ese mismo usuario al tiempo que minimizan las interferencias de otros usuarios.

APUNTAR EL HAZ

El ejemplo más sencillo de configuración adaptativa consiste en dos antenas separadas media longitud de onda. Al recibir una llamada del usuario 1, la configuración determina que quien hace la llamada se encuentra al este geográfico (perpendicular a la configuración de antenas), dado que la señal S1 llega al mismo tiempo a ambas antenas. Para el usuario 1, el procesador suma las señales de una y otra antena con lo que obtiene la máxima intensidad de S1 y elimina la interferencia del usuario 2.



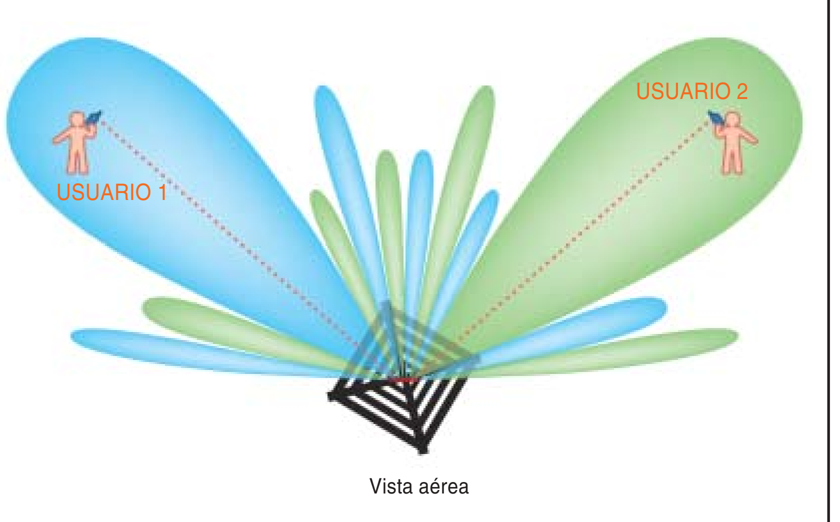


CAMBIO DE DIRECCION

Al recibir una llamada del usuario 2, el procesador determina que está situado al sur (alineado con la red), pues la señal que llega a una antena (S2) está desfasada 180 grados con respecto a la señal que llega a la otra antena (–S2). Para el usuario 2, por consiguiente, el procesador sustrae una señal de la otra, con lo que eleva al máximo la intensidad de S2 y elimina la señal procedente del usuario 1.

DOS LLAMADAS A LA VEZ

En la práctica, una configuración adaptativa contiene de 4 a 12 antenas. El procesador realiza complejas operaciones matemáticas con las señales procedentes de las antenas para garantizar que el haz y los lóbulos generados para el usuario 1 (*en azul*) no se solapen con los que se han creado para el usuario 2 (*en verde*). De ese modo, los dos usuarios de teléfonos móviles no se interfieren aun cuando utilicen la misma frecuencia en sus comunicaciones.



Vista aérea

SARA CHEN

las reflexiones son numerosas, la configuración adaptativa podrá transmitir o recibir hacia una pequeña zona alrededor del teléfono, o desde la misma. De este modo, la configuración no genera un haz de radio, sino que crea una minúscula "célula personal", tal vez de sólo unos centímetros de radio. Y como la configuración está continuamente calculando la posición del teléfono, la célula personal irá acompañando al abonado en sus desplazamientos.

Ventajas y aplicaciones

Las redes inalámbricas que utilizan configuraciones adaptativas de antenas ofrecen varias ventajas sobre las redes celulares ordinarias. Dado que el alcance de una estación base equipada con una configuración adaptativa es mucho mayor que el de una estación ordinaria que transmita a la misma potencia, se necesitarán menos estaciones para cubrir una determinada zona. Es cierto que una configuración adaptativa de antenas puede costar más que una antena tradicional, pero la reducción del número de estaciones base rebaja mucho los costes de instalación y explotación de una red de telefonía móvil.

El empleo de configuraciones adaptativas facilita además que la compañía operadora del servicio celular aproveche mejor un recurso escaso: el espectro de frecuencias que se le ha asignado para transmitir las señales. Muchos sistemas celulares sufren ya sobrecarga: en ciertas zonas congestionadas las señales de llamada se acumulan y se sobrepasa el tráfico que puede cursar el limitado número de radiocanales. Los usuarios sufren el trastorno cuando se les corta la comunicación o reciben señales de mala calidad. Pero la técnica de las configuraciones adaptativas aumenta la capacidad del espectro al posibilitar que varios usuarios comprendidos en la zona de cobertura de una estación base compartan un mismo radiocanal. La mejora con respecto a las antenas ordinarias es notable: las estaciones base equipadas con configuraciones adaptativas de antenas pueden multiplicar por seis el número de personas a quienes se da servicio en la comunicación de voz, y por cuarenta en la transmisión de datos. Se logra así un mejor servicio y se reduce la interferencia, aparte del ahorro de energía y la menor contaminación radioeléctrica.

No es de extrañar, pues, que las configuraciones adaptativas tengan ya aplicación comercial. Hay instaladas más de 150.000 estaciones base celulares con la técnica de ArrayComm en Japón, China, Tailandia y otros países de Asia y Africa. En total, las configuraciones adaptativas de antenas dan servicio a más de 15 millones de usuarios. En EE.UU. y Europa se está tardando más en adoptarlas, en parte porque las dificultades económicas de las empresas de telecomunicaciones han restringido las inversiones en las redes de telefonía móvil.

Las configuraciones adaptativas resultan también muy convenientes para las redes inalámbricas de datos. Al reducirse al mínimo la interferencia, las configuraciones adaptativas pueden recibir y transmitir más datos a los usuarios en una determinada porción del espectro de frecuencias. Una estación base equipada con una configuración adaptativa podría enviar datos a cuarenta usuarios a un megabit por segundo, veinte veces más rápido de lo que es habitual en las redes inalámbricas de largo alcance. Y puesto que no todos los usuarios de esas redes necesitan transmitir a velocidad máxima al mismo tiempo, una estación base equipada con configuración adaptativa podría atender a varios miles de personas. Los usuarios de ordenadores portátiles, u otros dispositivos similares, mantendrían un acceso continuo de alta velocidad a Internet mientras caminan o conducen a través de la zona de cobertura.

Desde finales del decenio pasado, la industria de telecomunicaciones viene anunciando la llegada de la Internet sin hilos (*véase* "Internet inalámbrica"; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, por Mark Alpert y George Musser, diciembre 2000). El desarrollo de las nuevas redes ha sido más lento de lo que en principio se esperaba; no obstante, los trabajos avanzan. Mientras los operadores inalámbricos siguen empeñados en la creación de redes 3G —la próxima generación de sistemas celulares, que transmiten los datos en paquetes—, hay empresas que ofrecen soluciones distintas para la transmisión de datos a alta velocidad. Algunas han incorporado ya a sus propuestas las antenas inteligentes, que pueden también utilizarse en las redes ya existentes. En Sidney funciona una red de datos basada en las técnicas de ArrayComm, y quizá se instalen pronto redes similares en EE.UU. y Corea del Sur. También Navini Networks, de Richardson, tiene configuraciones adaptativas de antenas que algunos operadores inalámbricos andan probando en estos momentos. Varios fabricantes importantes de equipos de telecomunicación tienen pensado incluir las antenas inteligentes en su próxima generación de productos.

Durante los casi cien años posteriores a la invención del teléfono por Graham Bell, las comunicaciones vocales han dependido de una conexión física —conductor o cable coaxial— entre el que llama y la red. En los treinta años últimos, sin embargo, los teléfonos móviles nos han hecho saborear la libertad de comunicarnos sin hilos. Ayudados por las técnicas de las configuraciones adaptativas de antenas, los operadores podrán ofrecer prestaciones mucho mejores, a costes mucho más bajos, que las actuales redes alámbricas. Solamente entonces saldremos por fin de nuestra jaula de cobre.

Bibliografía complementaria

A REVIEW OF THE COCKTAIL PARTY EFFECT. Barry Arons, en *Journal of the American Voice I/O Society*, vol. 12; julio de 1992.

INTELLIGENT ANTENNAS: SPATIAL DIVISION MULTIPLE ACCESS. Martin Cooper y Marc Goldburg, en *1996 Annual Review of Communications*, págs. 999-1002.

A LAYMAN'S GUIDE TO CELLULAR. Martin Cooper, en *1996 Annual Review of Communications*, págs. 993-997.

SMART ANTENNAS FOR WIRELESS COMMUNICATIONS: IS-95 AND THIRD GENERATION CDMA APPLICATIONS. Joseph C. Liberti y Theodore S. Rappaport. Prentice Hall, 1999.



Las raíces del cáncer

La investigación reciente ha cosechado pruebas que cuestionan la teoría al uso sobre la oncogénesis y abre nuevos caminos para detener el tumor antes de que prolifere

W. Wayt Gibbs

Si preguntamos a bote pronto por la causa del cáncer, encontraremos respuestas de tenor diverso: el tabaco, el abuso del alcohol, la exposición prolongada a los rayos solares, la carne asada, una infección de papilomavirus o el amianto. Por supuesto, todo eso tiene relaciones estrechas con el cáncer. Pero no pueden ser su causa última, su raíz. Una buena parte de la población persiste expuesta a estos carcinógenos y, sin embargo, sólo en una minoría provocan tumores peligrosos.

Toda causa, por definición, lleva a su efecto. La causa inmediata del cáncer debe encontrarse en alguna asociación de agresiones y accidentes que induzcan a las células normales de un organismo humano adulto sano a convertirse en malignas, que se multiplican como las malas hierbas y aparecen en lugares insólitos.

En ese terreno, la causa del cáncer no encierra ningún misterio. Hace un decenio muchos genéticos creían que la ciencia estaba en puertas de dar con la respuesta final: el cáncer es el resultado de mutaciones acumuladas que alteran sitios específicos del ADN de una célula y cambian, por ende, las proteínas codificadas por genes relacionados con el cáncer. Las mutaciones afectan a dos tipos de genes relacionados con el cáncer. Pertenecen al primero los supresores de tumores. En condiciones normales, restringen la capacidad de división de las células; pero las mutaciones incapacitan de forma permanente tales genes. La segunda variedad, el grupo de los oncogenes, estimula el crecimiento, es decir, la división celular. Las mutaciones fijan los oncogenes en un estado activo. Algunos investigadores siguen aceptando como un axioma que tales cambios promotores del crecimiento en unos cuantos genes vinculados con el cáncer constituirían el proceso inicial y causa radical de cualquier tumor maligno.

Hay oncólogos que, no obstante, cuestionan ese planteamiento. Nadie cuestiona que el cáncer sea, a la postre, una patología del ADN. Pero al seguir la pista de los tumores hasta su última raíz, han ido saliendo a la luz otras alteraciones que operan en el interior de los núcleos de las células; aunque no sean todavía cancerosas, están en camino de serlo. Se han perdido cromosomas enteros, cada uno con 1000 genes o más, o se han duplicado. Se observan segmentos cromosómicos mezclados fuera de lugar, truncados, o fundidos entre sí. Se ha comprobado que los añadidos químicos a la molécula de ADN o de las histonas, proteínas que aquél rodea, silencian genes importantes, aunque en un proceso reversible, distinto del fenómeno de la mutación.

Con toda esa gavilla de resultados se han esbozado tres hipótesis, al menos, que compiten con el dogma estándar a la hora de ofrecer una explicación plausible de los cambios primeros y las aberraciones decisivas en la transformación de una célula y su progenie en un tejido que funciona con normalidad hasta convertirse en un tumor de propiedades invasoras. Transformación que viene a durar un decenio.

Se pone en cuestión la tesis dominante, según la cual la enfermedad resultaría de una situación genética determinada. De la investigación reciente emerge una tesis alternativa: el cáncer sería el desenlace final de un proceso caótico; además, de acuerdo con la ley de selección natural, en un ambiente competitivo, lo que mejor se adapta sobrevive y prospera.

Desde ese enfoque común, se discrepa sobre el tipo de tratamiento que reportará mejores frutos. Unos sugieren que muchos cánceres podrían prevenirse con mejores exploraciones, cambios en la dieta, nuevos fármacos (o incluso viejos como la aspirina), pero otros se muestran escépticos ante tales promesas.

1. COREOGRAFIA CROMOSOMICA orquestada durante el proceso de división celular. Si se dan pasos equivocados, que enredan a los cromosomas, o hay un reparto desigual del número de éstos en cada célula hija, podemos hallarnos en los prenotandos de la oncogénesis.

JEFF JOHNSON *Hybrid Medical Animation*

Marcas de malignidad

Toda teoría razonable sobre el cáncer tendría que explicar por qué es una enfermedad que se manifiesta, de preferencia, en la vejez y por qué no se muere siempre de ella. Una persona de 70 años tiene una probabilidad unas 100 veces mayor de que le diagnostiquen una enfermedad maligna que otra de 19 años. Además, la mayoría de los humanos llega a una edad avanzada sin sufrir un cáncer.

Para mantener un sujeto en buen estado de salud que cumple los 80 años de vida, se ha requerido la cooperación de más de diez mil billones de células. Si cualquier célula de cifra tan ingente puede dar lugar a un tumor, ¿por qué sólo un número muy inferior a la mitad de la población adquirirá un tumor lo suficientemente grave como para recabar la atención del médico?

Podría aducirse en respuesta que una célula ha de adquirir varias facultades extraordinarias para ser maligna. Según Robert A. Weinberg, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, debe haber perturbados entre cinco y seis sistemas reguladores diferentes para que una célula normal se convierta en cancerosa y prolifere. En una revisión publicada en noviembre de 2002, Weinberg y William C. Hahn, éste del Instituto Dana-Farber de Investigaciones Oncológicas de Boston, exponían que todos los cánceres que representan una amenaza para la vida manifiestan al menos seis capacidades especiales.

Por ejemplo, las células cancerosas siguen dividiéndose en situaciones en que las células normales permanecen en reposo, a la espera de una señal química especial que podría provenir de una zona vecina lesionada; se las arreglan para alterar tales mensajes relacionados con el crecimiento. Y a la inversa, las células tumorales han de ignorar las órdenes de paro de la división emitidas por los tejidos adyacentes que ellas presionan y por sus propios mecanismos internos de envejecimiento.

Todas las células cancerosas tienen graves problemas con su ADN. A medida que éste se replica una y otra vez, muchas células de la colonia resultante acaban situadas lejos de los vasos sanguíneos que les suministran oxígeno y nutrientes. Este tipo de estrés dispara mecanismos de autodestrucción en las células sanas. Las células tumorales encuentran un camino para evitar el suicidio: persuaden a los vasos sanguíneos cercanos para que construyan la infraestructura que necesitan para prosperar.

El quinto poder especial que los cánceres, salvo raras excepciones, adquieren es la inmortalidad. Un cultivo de células humanas normales deja de multiplicarse cumplidas 50 o 70 generaciones. Con ese número de divisiones les basta para mantener hasta un siglo la vida sana de una persona. Pero la gran mayoría de las células de un tumor muere rápidamente por sus fallos genéticos; en consecuencia, las que sobreviven deben reproducirse sin tasa para la proliferación del tumor. Las células que sobreviven lo hacen en parte por la manipulación de sus telómeros, complejos de ADN sin genes y proteína que protegen los extremos de cada cromosoma.

Los tumores que desarrollan estas cinco facultades, aunque representan un problema, probablemente no son letales. Es la sexta propiedad, la capacidad de invadir tejidos cercanos y después formar metástasis en otras regiones remotas, lo que confiere al cáncer su carácter mortal. Las invasiones locales pueden extirparse por intervención quirúrgica. Pero nueve de cada 10 fallecimientos por cáncer se deben a las metástasis.

Sólo ciertas células de un tumor parecen adquirir esta capacidad de desprenderse de la masa inicial, discurrir por la circulación y establecer una nueva colonia en un órgano diferente del que le dio origen. Para cuando se descubren, muchos cánceres han producido ya, por desgracia, metástasis. El pronóstico se tiñe entonces de tonos sombríos.

El orden del desorden

Los médicos podrían encontrar tumores incipientes mucho antes si los científicos identificaran los pasos recorridos por las células hasta convertirse en cáncer, tras el ataque inicial contra su ADN por un carcinógeno o un percance bioquímico inesperado. En líneas generales, se está de acuerdo sobre los rasgos de las células enfermas que surgen en ese camino. La discrepancia gira en torno a la fuerza motora y al orden secuencial de las etapas.

Desde hace un cuarto de siglo se ha venido admitiendo que los tumores crecen en episodios de mutación y expansión. La alteración genética de una célula borra o altera un gen supresor de tumores —el *RB*, el *p53* y el *APC* se encuentran entre los mejor conocidos—, con la ausencia consiguiente de proteínas encargadas de velar por la integridad del genoma y responsables del proceso de la división celular. En una opción alternativa, una mutación podría avivar la actividad de un oncogén —como el *BRAF*, *c-fos* o el *c-erbb3*— cuyas proteínas estimulan la proliferación celular.

Los cambios operados en los genes vinculados con el cáncer confieren a la célula una o varias de las capacidades especiales reseñadas, permitiéndole que crezca con ventaja sobre las que son sus vecinas. A través de la secuencia de ADN, la célula transmite las anomalías a su progenie, que termina por formar una suerte de ejército clónico que crece hasta los límites de su capacidad. Con el tiempo, otra mutación aleatoria sufrida por un gen vinculado con el cáncer derriba otro obstáculo, lo que posibilita un nuevo episodio de proliferación.

Por norma, las células poseen dos copias de cada cromosoma —uno de la madre y otro del padre— y, por tanto, dos copias, o alelos, de cada gen. (En el varón el carácter singular de los cromosomas X e Y constituye una notable excepción.) Basta una mutación en sólo uno de los alelos para que se active permanentemente un oncogén. Pero se requieren dos embates para eliminar ambos alelos de un gen supresor del tumor. Entre cuatro y diez mutaciones en los genes precisos pueden transformar cualquier célula. Eso reza la teoría, por lo menos.

El paradigma "gen-mutante" se ganó la aceptación casi universal porque explicaba muy bien lo observado en experimentos con ratones transformados genéticamente y con cultivos de células humanas. Pero las nuevas técnicas permiten ahora estudiar los genomas de células cancerosas y precancerosas extraídas directamente del paciente. Muchos resultados recientes ponen sordina a la idea de que las mutaciones en unos pocos genes constituyan la raíz de todos los cánceres.

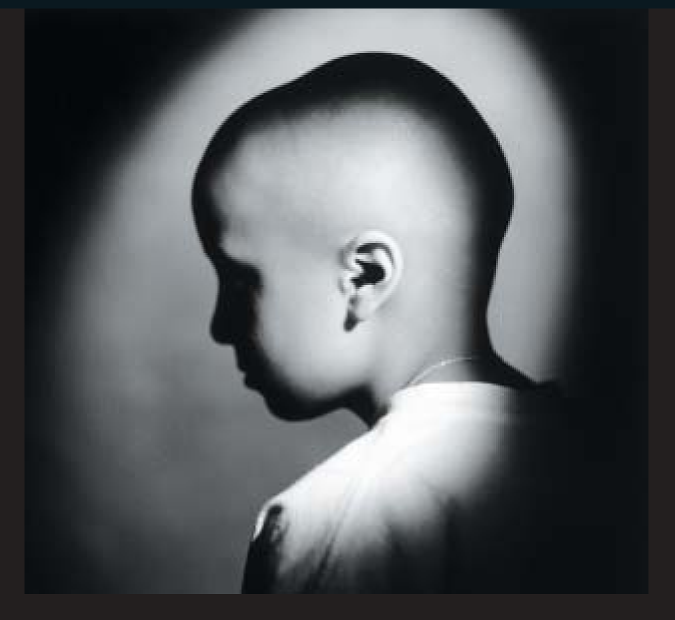
Fenómenos inexplicados

Hace poco Muhammad Al-Hajj y sus colaboradores, de la Universidad de Michigan en Ann Arbor, señalaron que habían identificado marcas distintivas de un extraño subgrupo de células en cánceres de mama, dotado de capacidad para formar nuevos tumores. Bastó

Resumen/*Así surge el cáncer*

- **El cáncer es una enfermedad genética. En el interior de las células pueden darse alteraciones del ADN que les confieren "superpoderes" lesivos; entre otros, la capacidad para crecer en cualquier región y continuar dividiéndose sin tasa.**
- **Desde hacía tiempo la investigación se centraba en las mutaciones que afectaban a un grupo pequeño de genes relacionados con el cáncer; creíase que constituían los episodios decisivos de la transformación de células sanas en tumores malignos.**
- **En los últimos años, sin embargo, han surgido otras teorías que cuestionan dicho enfoque. Propone una de ellas que el fallo en la duplicación o reparación del ADN comporta millares de mutaciones al azar en las células. Para otra, los cromosomas se tornan peligrosos porque la lesión de varios genes maestros provocan que se enreden entre sí. A tenor de una tercera hipótesis, en el número anómalo de cromosomas de una célula residiría el primer jalón del camino que lleva al cáncer.**

SEIS SUPERPODERES LESIVOS DEL CANCER

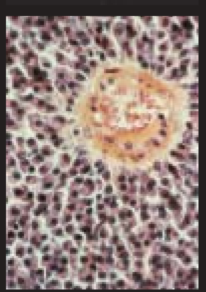


1. CRECIMIENTO INCLUSO EN AUSENCIA DE SEÑALES NORMALES DE "ADELANTE"



La mayoría de las células normales esperan una orden externa para dividirse. Las células cancerosas (*imagen*) falsifican a menudo los mensajes y siguen desarrollándose.

2. CRECIMIENTO A PESAR DE LAS SEÑALES DE "PARO" ENVIADAS POR LAS CELULAS VECINAS



A medida que el tumor (*amarillo*) se expande, presiona el tejido adyacente; éste, en condiciones normales, le enviaría mensajes químicos para que se detuviera. Las células malignas hacen caso omiso de dicha información.



3. INSUMISION ANTE LOS MECANISMOS PROPIOS DE AUTODESTRUCCION

En las células sanas, los trastornos genéticos que superan determinado umbral crítico, activan un programa de apoptosis o autodestrucción. Las células cancerosas (*magenta*) se saltan ese mecanismo, aunque a veces el sistema inmunitario logra que las células cancerosas se autodestruyan.

4. CAPACIDAD PARA ESTIMULAR LA ANGIOGENESIS

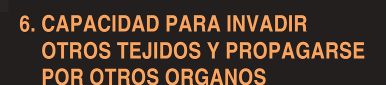


Los tumores necesitan oxígeno y nutrientes para vivir. Los obtienen tras conseguir que los vasos sanguíneos de su vecindad formen nuevas ramificaciones (*trazos marrones*), que se adentran en la masa en crecimiento.

5. INMORTALIDAD EFECTIVA



En unas setenta veces se cifra el número máximo de divisiones de una célula sana. Para formar un tumor, las células malignas necesitan traspasar ese guarismo para formar un tumor. Por eso actúan en torno a sistemas que, como los telómeros (*amarillo*) del extremo de los cromosomas (*azul*), refuerzan el límite reproductor.



6. CAPACIDAD PARA INVADIR OTROS TEJIDOS Y PROPAGARSE POR OTROS ORGANOS



El cáncer empieza a representar una amenaza para la vida cuando inutiliza los circuitos celulares que los confinan en la zona específica del órgano donde se originaron. Aparecen entonces neoformaciones (*naranja y amarillo*) que terminan por bloquear sistemas vitales.

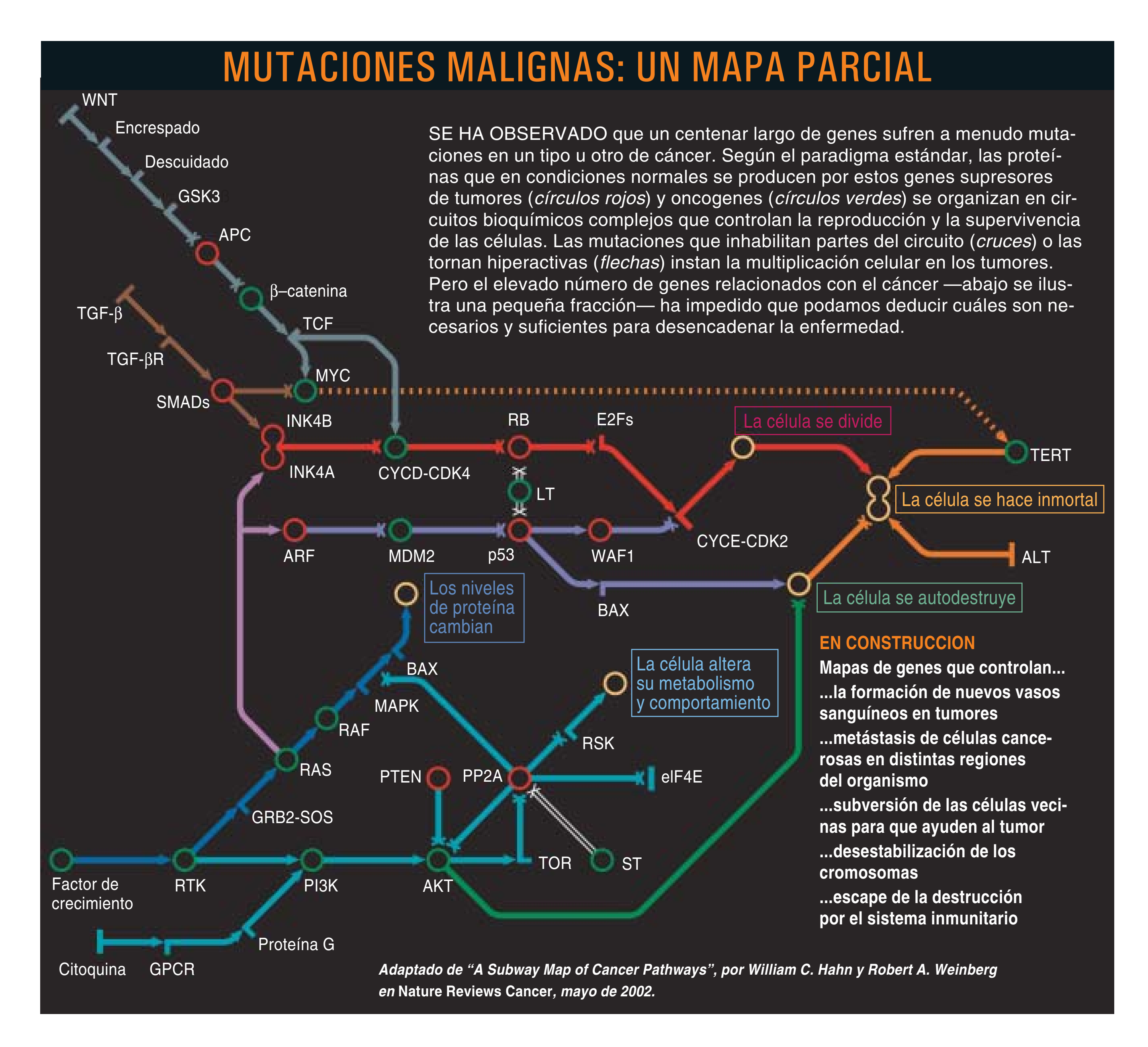
En sentido horario desde arriba a la izquierda: CHRIS JONES *Corbis;* PETER LANSDORP *Universidad de Columbia Británica;* SCIENCE PHOTO LIBRARY; FRANK LYNCH *Laboratorios Moleculares QualTek;* ANDREJS LIEPINS/SPL; CNRI/SPL; SPL

un centenar de células de este tipo para desencadenar la patología cuando se inyectaron en ratones desprovistos de sistema inmunitario. Lo que no consiguieron, en cambio, decenas de millares de otras células, extraídas de los mismos nueve tumores malignos, pero carentes de las señales indicativas. Según corrobora John E. Dick, de la Universidad de Toronto, quien ha identificado células semejantes en leucemias, nos hallamos ante la primera célula iniciadora de un tumor, que nadie había conseguido hasta entonces aislar de un tumor sólido.

Así las cosas, cabría sospechar de inmediato que sólo una pequeña fracción de las células del tumor fuera la responsable de su crecimiento y metástasis; de la enfermedad y de la muerte del paciente. Si se demuestra que tal ocurre en el hombre, lo mismo que en el ratón, podría verse en apuros la teoría del cáncer basada en la idea "mutante-gen". Si las mutaciones, que se copian de una célula a su progenie, aportan a las células tumorales sus poderes, ¿no deberían ser igualmente potentes todos los clones del conjunto?

La mayoría de los tumores no son masas de clones idénticos. Antes bien, un examen atento ha revelado la sorprendente diversidad genética entre sus células, algunas de las cuales difieren tanto de las células humanas normales (y además entre sí), que se les podría considerar especies nuevas.

El gen *p53* y alguno más relacionados con el cáncer parecen estar mutados en la mayoría de los tumores. Pero muchos otros genes vinculados con el cáncer cambian sólo en una pequeña fracción de tipos tumorales, en una minoría de



SE HA OBSERVADO que un centenar largo de genes sufren a menudo mutaciones en un tipo u otro de cáncer. Según el paradigma estándar, las proteínas que en condiciones normales se producen por estos genes supresores de tumores (*círculos rojos*) y oncogenes (*círculos verdes*) se organizan en circuitos bioquímicos complejos que controlan la reproducción y la supervivencia de las células. Las mutaciones que inhabilitan partes del circuito (*cruces*) o las tornan hiperactivas (*flechas*) instan la multiplicación celular en los tumores. Pero el elevado número de genes relacionados con el cáncer —abajo se ilustra una pequeña fracción— ha impedido que podamos deducir cuáles son necesarios y suficientes para desencadenar la enfermedad.

Adaptado de "A Subway Map of Cancer Pathways", por William C. Hahn y Robert A. Weinberg en Nature Reviews Cancer*, mayo de 2002.*

los pacientes, o en algunas células salpicadas dentro del tumor. El equipo liderado por David Sidransky, de la Universidad de Johns Hopkins, analizó ADN extraído de 476 tumores de clases diversas. En abril publicaron que el oncogén *BRAF* estaba alterado en dos tercios de los cánceres papilares del tiroides. Pero el *BRAF* no se encontraba mutado en ningún otro de los tipos de cánceres del tiroides.

Más aún, algunos de los genes del cáncer más alterados dan lugar a efectos muy dispares. El grupo de Bert E. Vogelstein, de Johns Hopkins, encontró que los oncogenes *c-fos* y *c-erbb3,* tan estudiados, son curiosamente menos activos en los tumores que en los tejidos normales cercanos. Se ha demostrado que el gen supresor de tumores *RB* es hiperactivo —no inutilizado— en algunos cánceres de colon; de forma aviesa, parece proteger esos tumores de sus mecanismos de autodestrucción.

La hipótesis del "golpe doble" —que deben desactivarse ambos alelos de un gen supresor de tumores— también ha ganado enteros con el descubrimiento del fenómeno de haploinsuficiencia. En ciertos cánceres los supresores de tumores no presentan ninguna mutación. Lisa y llanamente han recortado su producción, lo que parece suficiente para arrastrar a las células hacia la malignidad. Comprobado ya ese efecto en una docena larga de genes supresores de tumores, se espera encontrar muchos más de su misma índole. La búsqueda de la mera presencia o ausencia de las proteínas de un gen resulta harto simplista. La proporción es lo que importa.

Más allá de la mutación

Se presta ahora mayor atención a otros fenómenos, además de los errores en la secuencia de ADN en un gen, que puedan alterar de forma drástica la concentración de una proteína en la célula. Mencionaremos la pérdida o ganancia de un cro-

mosoma (o parte de uno) que contiene el gen; los cambios en la concentración de otras proteínas que regulan la transcripción del ADN a ARN y su traducción en una proteína, y los fenómenos epigenéticos que modifican la actividad de los genes por medios reversibles. Cambios todos ellos que solemos hallar en cánceres establecidos. Diríase que no parece sino que la mayoría de los tumores sólidos en los adultos esconden una bomba en el núcleo celular. Se aprecian fragmentos de cromosomas ahorquillados juntos, así como duplicaciones o pérdida de cromosomas enteros.

Carecemos de un término para designar la secuencia de aberraciones cromosómicas que se observan en el cáncer. La palabra “aneuploidía”, empleada antaño para indicar un número anómalo de cromosomas, ha ensanchado su campo semántico para incluir cromosomas truncados, cromosomas con extensiones o cromosomas con segmentos intercambiados. La emplearemos aquí en ese sentido más amplio.

Hace casi un siglo, el biólogo alemán Theodor Boveri advertía el extraño desequilibrio existente, en las células cancerosas, entre el número de cromosomas maternos y el de los paternos. Sugirió también que las células aneuploides podrían causar la enfermedad. Pero no pudo hallarse un patrón recurrente para el caos cromosómico. En efecto, el genoma de una célula cancerosa típica no es sólo aneuploide, sino que además es inestable y cambia con cadencia de pocas generaciones.

A medida que la búsqueda de oncogenes comenzó a dar sus frutos, se fue abandonando la idea de Boveri. La inestabilidad genómica masiva y la aneuploidía, descartado ya su carácter de prerrequisitos, se consideraron efectos secundarios del cáncer.

También fracasó la hipótesis del oncogén/gen supresor del tumor, pese a los veinte años de esfuerzos para identificar un grupo particular de mutaciones de genes que ocurre en cada caso de cualquiera de los tipos de cánceres más comunes y letales. La lista de las mutaciones relacionadas con el cáncer cuenta ya con más de 100 oncogenes y 15 genes supresores de tumores. El ritmo a que se identifican estos marcadores moleculares sigue creciendo; cabe, pues, la posibilidad de que cada tumor sea único en la pauta seguida por su desquiciamiento genético.

Pero la construcción de tumores artificiales mediante genes cancerosos mutantes no lo explica todo. El quid de la cuestión reside en discernir qué es lo que interviene primero, si las mutaciones o la aneuploidía. Se han propuesto al menos tres hipótesis al respecto. Las denominaremos dogma modificado, teoría de la inestabilidad temprana y teoría de la aneuploidía integral. No es mal augurio que comiencen a converger a medida que se reajustan para dar cuenta de nuevos resultados experimentales.

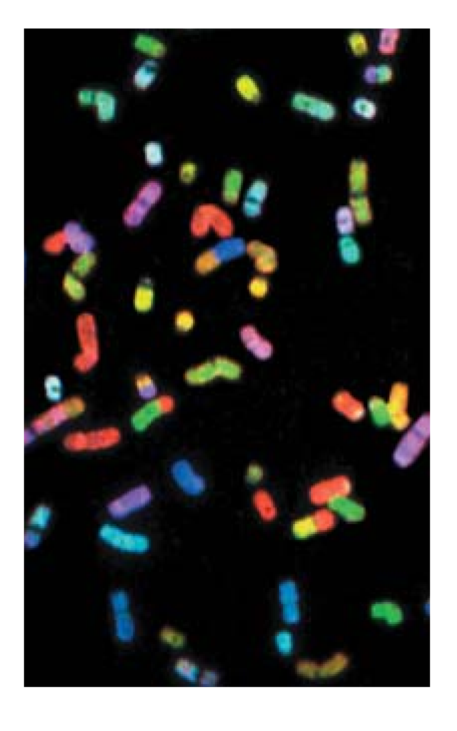
La forma modificada del dogma estándar retoma una idea lanzada en 1974 por Lawrence A. Loeb. Con otros genéticos defiende que, por término medio, la mutación al azar afectará sólo a un gen en una célula dada en el curso de la vida. Algo —un carcinógeno, oxidantes reactivos, una disfunción del ADN en su duplicación y maquinaria de reparación de la célula— ha de acelerar drásticamente el ritmo de mutación. Si no fuera así, las células no acumularían un número suficiente de mutaciones para desarrollar un tumor.

Loeb cree que, en una etapa precoz de la oncogénesis, existen ya de 10.000 a 100.000 mutaciones aleatorias por célula. No niega que a su teoría le falta respaldo experimental de peso. El recuento de mutaciones al azar es difícil; se ha de comparar los genomas de las células individuales letra a letra. Lo que sólo en fecha reciente ha sido viable merced al progreso de la biotecnología.

El dogma modificado podría así añadir un prólogo a la historia de la biología del cáncer aceptada desde hace tiempo. Pero los hitos principales de ese decurso histórico siguen reservados a las mutaciones génicas que sirven para aumentar el éxito reproductor de las células. Los cromosomas alterados que cambian sin cesar son sólo subproductos fortuitos.

Inestables desde el comienzo

Cristoph Lengauer y Vogelstein, de la Universidad Johns Hopkins, especialistas en cáncer de colon, han propuesto una teoría al-

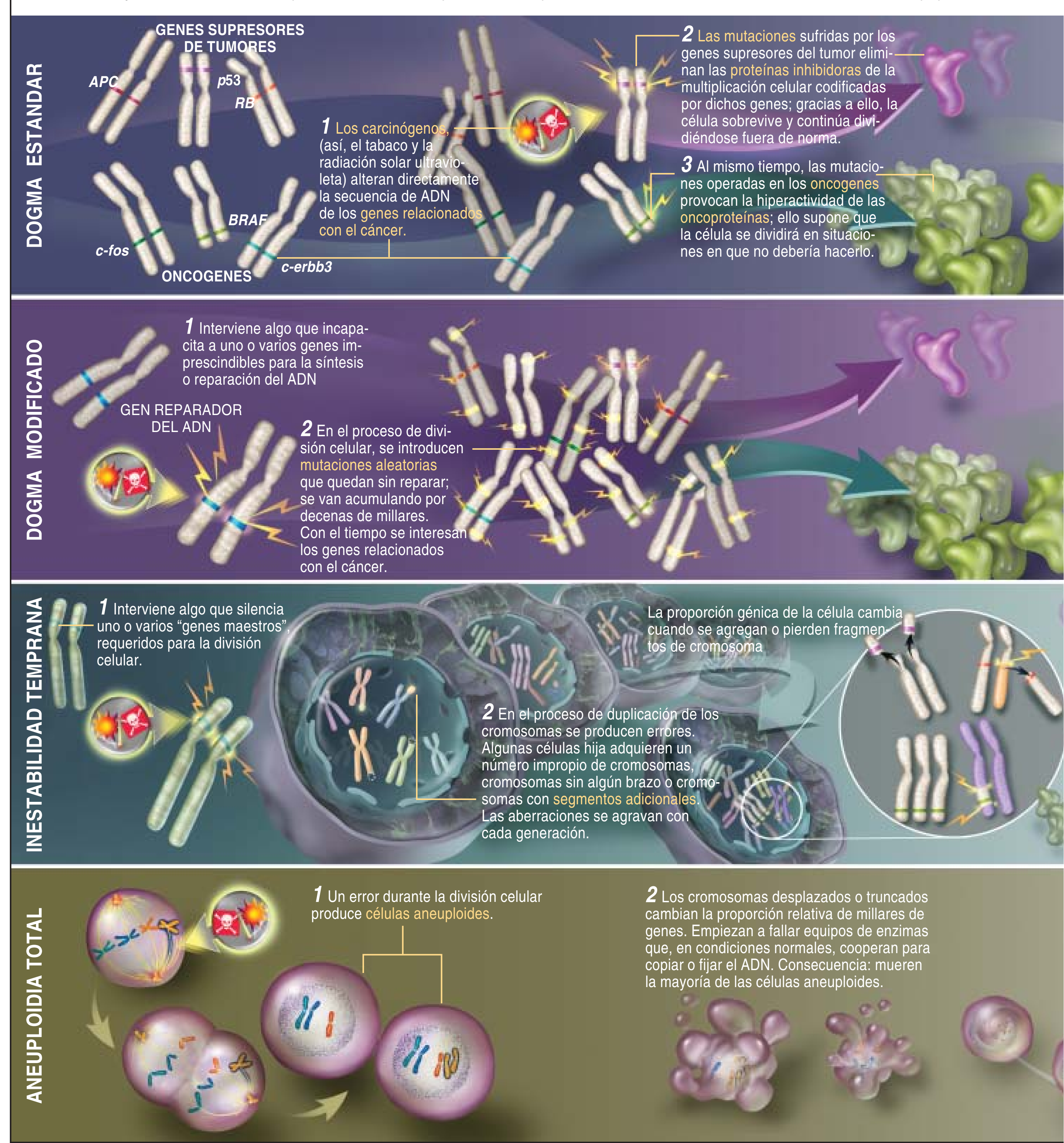


HESED M. PADILLA-NASH Y THOMAS REID *Instituto Nacional del Cáncer*

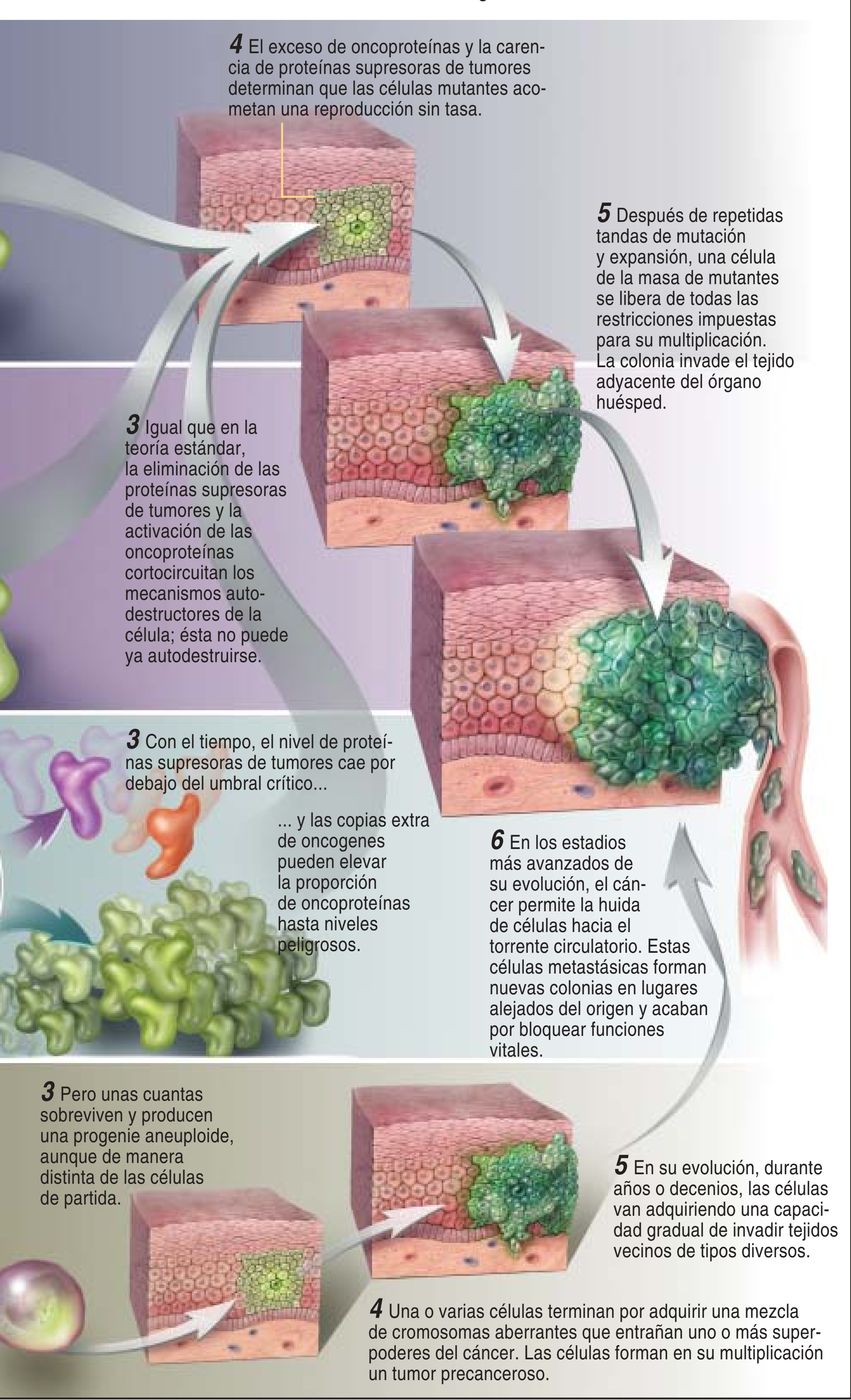
2. LA PRESENCIA DE CROMOSOMAS ABERRANTES en una célula cancerosa altera de golpe el nivel de millares de genes. Una célula sana (*abajo*) contiene un par de cada uno de los 22 tipos de cromosomas (*colores distintivos*), más dos cromosomas sexuales. En una célula maligna (*derecha*), algunos cromosomas contienen brazos de tipos diferentes (*de colores múltiples, en el borde izquierdo*). Otros indican miembros ausentes (*azul real*) o aparecen en número inapropiado (*verde lima*).

GENESIS DEL CANCER: CUATRO TEORIAS

DURANTE DECENIOS se ha venido atribuyendo el origen del cáncer a las mutaciones sufridas por unos cuantos genes especiales con la eliminación consiguiente de las proteínas supresoras del tumor y activación de las oncoproteínas. De un tiempo a esta parte, se han ido configurando tres teorías alternativas. Una modifica el paradigma estándar: postula un aumento drástico de la acumulación de mutaciones al azar por todo el genoma de las células precancerosas. Las otras dos teorías se centran en el papel de la



aneuploidía: aberraciones en gran escala experimentadas por los cromosomas. La aneuploidía podría llevar a una inestabilidad genómica en una fase precoz, para mutar después genes cancerosos conocidos. O podría formar tumores a través de una variedad casi infinita de cambios genéticos.



CHRISTY KRAMES

ternativa. Sostiene que puede darse la inestabilidad cromosómica en fases tempranas. El flujo genético combina entonces sus fuerzas con la selección natural para producir un crecimiento benigno que puede después convertirse en un tumor maligno invasivo y agente de metástasis peligrosas.

En el marco de su exposición, aparecen varios genes "maestros" cuya función resulta determinante para que una célula se reproduzca con normalidad. Si, por una mutación o por una acción epigenética, se incapacita a estos genes, aunque sea a uno solo, la célula tropieza cada vez que intenta la danza coreográfica de la división celular, con el consiguiente desbarajuste de los cromosomas, llevados a un estado aneuploide. De ello resulta el aumento de la cadencia, hasta unas 100.000 veces, con la que las células pierden al azar uno de los dos alelos de sus genes. Para un gen supresor de tumor, un alelo perdido puede dejar al gen fuera de servicio, bien porque la otra copia esté ya mutada, bien por el efecto de la haploinsuficiencia. Lengauer y Vogelstein prosiguen: algunos de los genes del cáncer tienen que estar ya alterados antes de que pueda iniciarse un tumor maligno.

En diciembre de 2002, junto con Martin A. Nowak y Natalia L. Komarova, del Instituto de Estudios Avanzados de Princeton, Lengauer y Vogelstein publicaron un análisis matemático que aplicaba esta teoría al cáncer de colon no hereditario. Según sus cálculos, aun cuando sólo hubiera media docena de genes "maestros" en el genoma humano, resultaría harto probable que un gen "maestro" quedara incapacitado antes de que un determinado gen del cáncer se viera afectado.

Los cálculos son elocuentes, pero sólo los datos empíricos convencen. Algunos trabajos recientes apoyan la teoría de la inestabilidad temprana. En el año 2000 el laboratorio de Lengauer examinó adenomas de colon —pólipos benignos que ocasionalmente se tornan malignos— y observaron que más del 90 por ciento tenían trozos de más, o de menos, de uno o varios cromosomas. Más de la mitad habían perdido el brazo largo del cromo-

soma 5, lugar del gen supresor de tumor APC, implicado desde hace tiempo en la formación del cáncer de colon. En otras investigaciones se han descubierto cromosomas aberrantes similares en formaciones precancerosas tomadas del estómago, esófago y mama.

Con todo, la teoría de la inestabilidad temprana deja cabos sueltos. ¿Cómo pueden las células con cromosomas cambiantes ganar en su competencia con sus homólogas estables? En condiciones normales, no cabe pensar que ocurra. Pero en una "zona de guerra", donde un carcinógeno u otro agente estresante alteran sin cesar a las células, las células normales dejan de dividirse hasta haber completado la reparación de su ADN. Las células genéticamente inestables escapan por ese portillo, pues sus sistemas de reparación de ADN están ya destruidos. Por eso sencillamente no se ven afectadas por las lesiones y siguen proliferando.

Pero, ¿qué es lo que produce tal desbarajuste cromosómico? No se ha logrado identificar ningún gen maestro, aunque ya hay varios sospechosos. German A. Pihan y sus colaboradores, de la Universidad de Massachusetts, podrían haber descubierto una pista en su estudio de 116 tumores premalignos resecados antes de que invadieran los tejidos vecinos del cuello uterino, próstata y mama. De 30 a 72 por ciento de esas formaciones contenían centrosomas defectuosos. (Los centrosomas son estructuras que aparecen durante la división celular para separar de los originales los cromosomas recién duplicados.) Como cabía esperar, la mayoría de esas células eran aneuploides. Siguen laborando en el análisis de todos los genes que controlan la formación y función del centrosoma; cualquiera de ellos podría ser un gen "maestro".

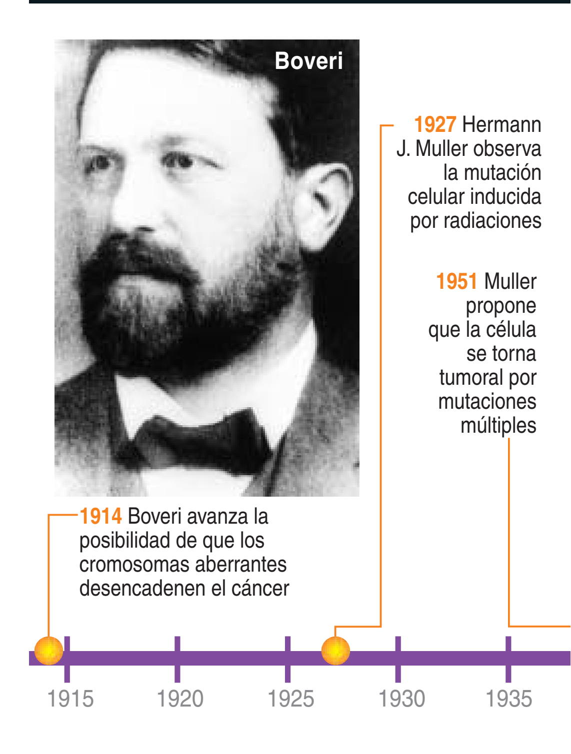
Aneuploidía

Por otra parte, podría ocurrir que algunas células se hagan malignas incluso antes de que mutaran genes "maestros", oncogenes o genes supresores de tumores. Peter H. Duesberg y Ruhong Li, de la Universidad de California en Berkeley, han adelantado una tercera teoría: casi todas las células cancerosas son aneuploides (con la salvedad de la leucemia) porque comienzan de esa manera. En la división celular pueden interponerse muchas cosas y provocar que una de las células hijas aparezca ya con un defecto en el número normal de su dotación de 46 cromosomas, mientras que la otra hija reciba una bonificación. Las fibras de amianto perturban el proceso.

La mayoría de las células aneuploides mueren al nacer o se desarrollan con lentitud. Pero las supervivientes presentan alterada su proporción de millares de genes. Lo que comporta la corrupción de paquetes de enzimas que sintetizan y mantienen el ADN. Aparecen roturas en la doble hélice, acentuando así la desestabilización del genoma. Cuanto más aneuploide sea la célula, tanto más inestable; aumentará también la probabilidad de que se produzcan combinaciones nuevas de cromosomas que le permitirán medrar en cualquier parte del organismo.

A diferencia de las otras tres teorías, la hipótesis de la aneuploidía integral predice que el inicio y el progreso de un tumor guardan una relación más íntima con el reparto cromosómico celular que con las mutaciones en los genes de esos cromosomas. Algunas observaciones abonan esa idea. Se acaba de comprobar en experimentos con embriones de hámster normales y aneuploides que, cuanto más se desviaban las células del número correcto de cromosomas, con tanta mayor presteza se acumulaban las aberraciones en sus cromosomas. La inestabilidad genómica aumentaba exponencialmente con el grado de aneuploidía.

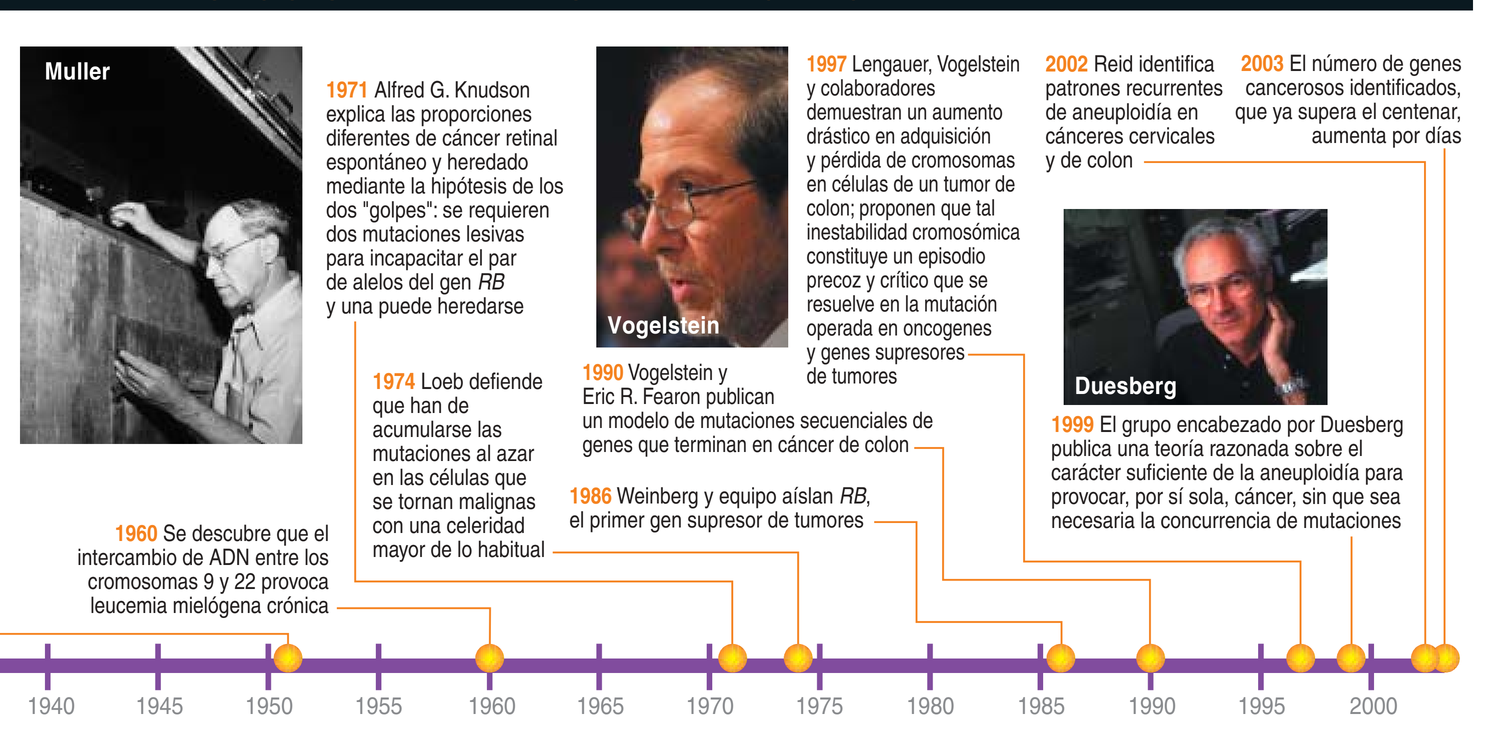
En sus investigaciones sobre aneuploidía en cánceres cervicales y colorrectales, Thomas Reid, del norteamericano Instituto Nacional del Cáncer, ha obtenido datos que apoyan la hipótesis en seres humanos. Aprecia patrones recurrentes de desequilibrios genómicos. En cada caso de cáncer colorrectal [no hereditario], por ejemplo, se observan adiciones en los cromosomas 7, 8, 13 o 20 o una pérdida del 18. En



el cáncer cervical, se produce muy pronto aneuploidía del cromosoma 3; las células involucradas parecen gozar de ventaja selectiva. A tenor de los resultados de Reid, la media de cromosomas anómalos aumenta gradualmente de 0,2 en una célula normal a 12 en las células de tumores metastásicos de colon. Concluye con Duesberg que la aneuploidía puede ser la primera aberración genética en las células cancerosas, si bien discrepa de éste en cuanto a la intervención de mutaciones génicas, que Reid ve necesarias.

Frenar al cáncer en su raíz

Ni el dogma estándar ni ninguna de las otras teorías pueden desenredar las raíces entreanudadas del largo centenar de enfermedades que se cobijan bajo la denominación común de cáncer. Menos, explicarlas como variaciones de un mismo principio. Y todas las teorías necesitan abrirse para incorporar el papel de los fenómenos epigenéticos, que podrían resultar decisivos.



De izquierda a derecha: SPL (*Boveri*); HULTON-DEUTSCH COLLECTION/*Corbis* (*Muller*); ALEX WONG *Getty Images* (*Vogelstein*); MARC GELLER (*Duesberg*)

Importa cribar la hipótesis más verosímil. Cada una formula sus propias predicciones sobre la mejor terapia contra los tumores más comunes y letales. Según la doctrina en vigor, los tumores van asociados a las proteínas producidas por los oncogenes, son, además, sensibles al efecto tóxico de las proteínas supresoras de tumores. Deberían, por tanto, diseñarse fármacos que rompan tal asociación o suministren el tóxico. Se trata de la estrategia adoptada por medicinas recientes, como el Gleevec (para formas raras de leucemia y cáncer de estómago) y Herceptin (para diversos tipos de cáncer avanzado de mama).

Pero los fármacos disponibles, incluidos el Gleevec y Herceptin, fallan en algunos pacientes porque sus tumores se convierten en una cepa resistente. Quizá no sea fácil obviar ese problema. En el seno de cualquier tumor, que contenga unos 100 millones de células, habrá células con mutaciones al azar que harán frente a cualquier medicamento imaginable. Lo ideal entonces sería retrasar el progreso del tumor, habida cuenta de la imposibilidad de sanarlo.

Para las personas de edad —las víctimas más frecuentes, a la postre— un retraso suficiente podría considerarse tan válido como la curación. Mejor incluso que demorar el progreso de un tumor sería frenar su formación en fase precoz. Si Lengauer y otros partidarios de la teoría de la inestabilidad temprana consiguen identificar los genes "maestros", cabría sintetizar fármacos que protegieran o restableciesen su función.

Si la correcta es la teoría de la aneuploidía integral, podría preferirse otra suerte de método discriminante. No existen medios para destruir selectivamente células con cromosomas anómalos. Pero una biopsia que revelara la presencia de células aneuploides en cuantía desmesurada podría garantizar una observación cuidadosa o una cirugía preventiva en ciertos casos. Duesberg sugiere que se examinen alimentos, fármacos y productos químicos para identificar los compuestos causantes de aneuploidía.

Algún día la ciencia nos dará una respuesta definitiva sobre el origen del cáncer. Todo apunta hacia una respuesta harto compleja, que nos obligue a abandonar la esperanza en fármacos sanadores para depositarla en medicinas que prevengan la enfermedad. Sin que se sepa por qué, una aspirina infantil diaria parece evitar el adenoma de colon en algunos adultos. El efecto es pequeño. Pero es un paso desde la quimioterapia hacia una alternativa mejor: la quimioprevención.

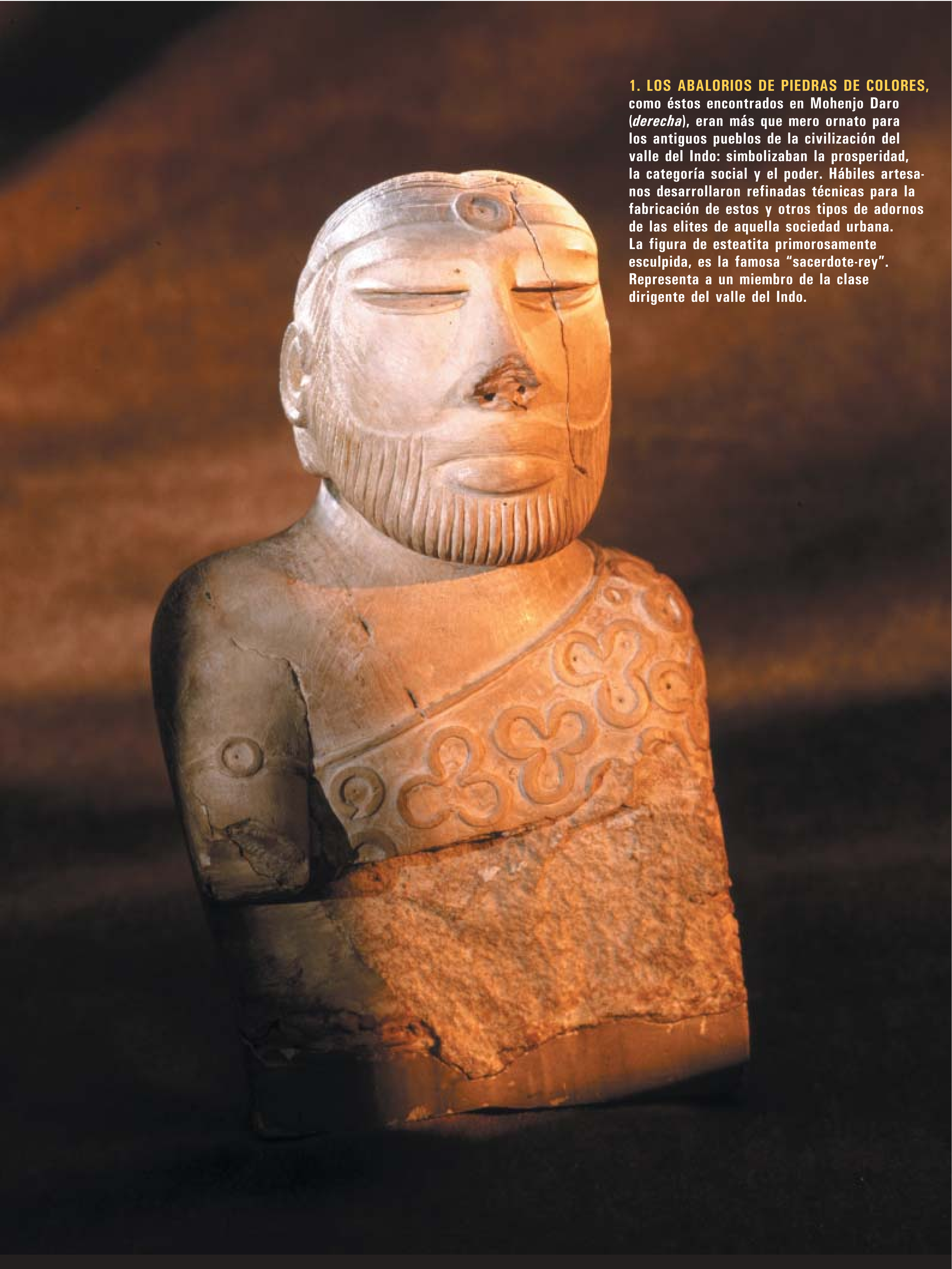
Bibliografía complementaria

ANEUPLOIDY PRECEDES AND SEGREGATES WITH CHEMICAL CARCINOGENESIS. Peter Duesberg, Ruhong Li, David Rasnick, Charlotte Rausch, Andreas Willer, Alwin Kraemer, George Yerganian y Ruediger Hehlmann, en *Cancer Genetics and Cytogenetics*, vol. 119, n.º 2, páginas 83-93; junio de 2000.

CHROMOSOME SEGREGATION AND CANCER: CUTTING THROUGH THE MYSTERY. Prasad V. Jallepalli y Christoph Lengauer en *Nature Reviews Cancer*, vol. 1, n.º 2, págs 109-117; noviembre de 2001.

RULES FOR MAKING HUMAN TUMOR CELLS. William C. Hahn y Robert A. Weinberg en *New England Journal of Medicine*, vol. 347, n.º 20, págs. 1593-1603; 14 de noviembre de 2002.

MULTIPLE MUTATIONS AND CANCER. Lawrence A. Loeb, Keith R. Loeb y Jon P. Anderson en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 100, n.º 3, págs. 776-781; 4 de febrero de 2003.



1. LOS ABALORIOS DE PIEDRAS DE COLORES, como éstos encontrados en Mohenjo Daro (*derecha*), eran más que mero ornato para los antiguos pueblos de la civilización del valle del Indo: simbolizaban la prosperidad, la categoría social y el poder. Hábiles artesanos desarrollaron refinadas técnicas para la fabricación de estos y otros tipos de adornos de las elites de aquella sociedad urbana. La figura de esteatita primorosamente esculpida, es la famosa "sacerdote-rey". Representa a un miembro de la clase dirigente del valle del Indo.



Ciudades perdidas del Indo

Los artefactos recientemente excavados en Pakistán han inspirado la revaloración de una de las grandes culturas urbanas de la civilización del valle del Indo

Jonathan Mark Kenoyer

RANDY OLSON *Aurora Photos*; DEPARTAMENTO DE ARQUEOLOGIA Y MUSEOS, GOBIERNO DE PAKISTAN (*izquierda y arriba*)

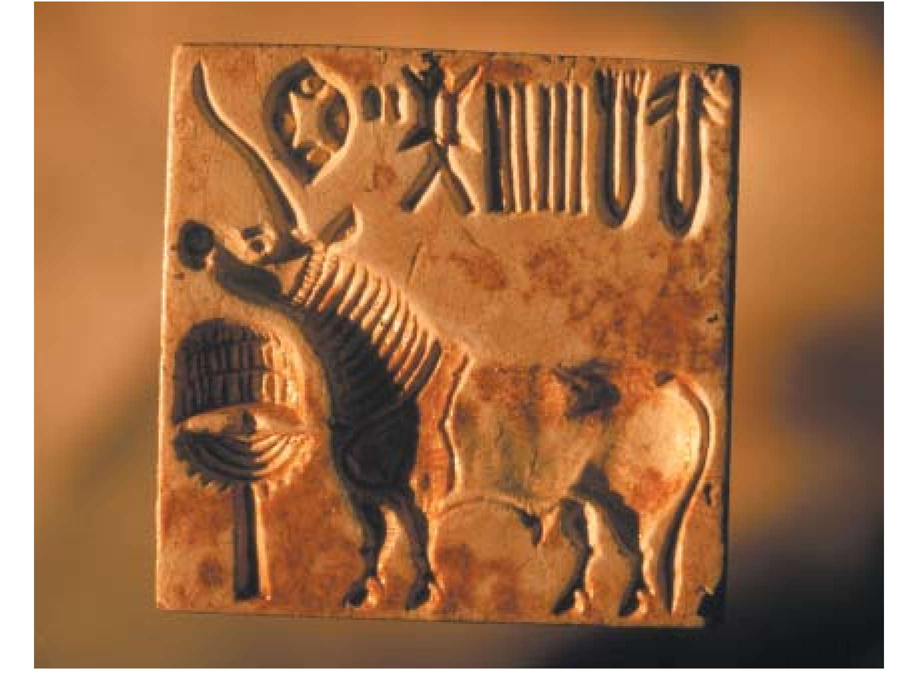
A mediados del decenio de 1980, durante nuestras primeras campañas de excavación de la ciudad de Harappa, veíamos pasar las ferias de primavera sin que advirtiéramos lo que podrían significar para nuestros estudios de la antigua civilización del Indo. La Harappa clásica hace siglos que desapareció. Cada año, en el paquistaní valle del Indo, las gentes de las aldeas viajan hasta las ciudades para asistir a las *sang*, 'ferias de reunión', donde músicos, actores y compañías circenses entretienen a las multitudes mientras buhoneros y comerciantes pregonan sus artículos. Duran un día. Las mujeres presentan ofrendas religiosas a unos peregrinos profesionales, a los que ruegan que transmitan al santo sufí Sakhi Sarwar sus peticiones por la salud de los niños, en especial la de los varones. Al final del día, estos devotos intermediarios y la compañía de seglares que los rodea se dirigen, a pie o en carros tirados por asnos, hasta la siguiente ciudad a la vera de una de las antiguas rutas comerciales de la región (*véase la figura 4*).

Al final, a cientos de kilómetros de allí, en las colinas del Beluchistán, diversos grupos de devotos peregrinos procedentes de distintas partes del país se reunirán en torno a la tumba del santo, elevarán preces y entregarán para el mantenimiento del santuario las limosnas que hayan recogido a lo largo de sus peregrinaciones. Repitiendo éstas al año siguiente por las mismas rutas, los peregrinos llevan consigo sal y tierra sagrada del lejano santuario como señales de favor para las madres afortunadas y sus recién nacidos.

Nuestra forma de ver la *sang* cambió cuando empezamos a excavar la puerta sur de Harappa, que daba acceso al terreno de la tradicional feria. Cribando la capa superior de las zanjas recién abiertas, recuperamos trozos de cerámica moderna, centenares de cuentas de vidrio fabricadas no hacía mucho tiempo, algunas monedas contemporáneas, balines de plomo,

fragmentos de juguetes de plástico y de hojalata, y hasta un pendiente de oro. Pero inmediatamente debajo de las capas superiores aparecieron antiguos artefactos harappeos que resultaban sorprendentemente similares a esos desechos modernos: tiestos de cerámica, ajorcas de terracota, abalorios de arcilla, carritos de juguete, fragmentos de figuritas y, de vez en cuando, tablillas con inscripciones y pesas que probablemente se utilizarían para el comercio y en el pago de tributos a la entrada de la ciudad.

Tales restos sugerían que por aquellos alrededores debió de haber un próspero mercado cuyas actividades, algunas con cuatro milenios de antigüedad, no serían muy distintas de las que todavía hoy se siguen ejerciendo. Nuestro ulterior trabajo ha confirmado esta hipótesis. Los aldeanos de las cercanías acudirían igual que hoy a la ciudad los días de mercado o de fiesta para participar en las ceremonias, renovar vínculos familiares o de clan y comprar o intercambiar artículos artesanales, adornos, por ejemplo, o cacharrería. Por las mismas rutas que recorren hoy los peregrinos y sus seguidores llegarían antaño a las puertas de Harappa materias primas procedentes de tierras más apartadas; en los numerosos talleres de la ciudad los transformarían los artesanos en objetos de lujo, que después serían adquiridos por los personajes de la elite local o exportados en naves a tierras lejanas. Entonces, como ahora, los habitantes del valle del Indo llevarían atavíos y joyas que demostraran su alcurnia o su riqueza. Para el observador moderno, tiene mucho de asombrosa la continuidad que en esta región se da entre la vida cotidiana del pasado y la del presente. Como arqueólogos, nos incumbe averiguar si estas semejanzas son el resultado de opciones culturales o se deben a que las materias y las técnicas disponibles no han cambiado gran cosa durante milenios.



2. LOS COMERCIANTES DEL INDO marcaban con sellos de arcilla vidriada etiquetas de arcilla blanda; se las ponían a las mercaderías para indicar la propiedad o como información contable. Los sellos llevaban grabados relieves con figuras de animales y símbolos de la escritura índica.

RANDY OLSON *Aurora Photos*; PROYECTO DE INVESTIGACION ARQUEOLOGICA DE HARAPPA Y DEPARTAMENTO DE ARQUEOLOGIA Y MUSEOS, GOVIERNO DE PAKISTAN

La enigmática civilización del valle del Indo fue, con las de Mesopotamia y Egipto y la del Río Amarillo en China, una de las cuatro grandes culturas-estado del Mundo Antiguo. Pero de ella se sabe mucho menos que de las otras tres, porque los lingüistas aún no han logrado descifrar la escritura harappea que vemos en los sellos, amuletos y cerámicas. Empeñados en saber cómo ese antiguo pueblo de la cultura del Indo ordenó su sociedad y cuáles fueron las fuentes del poder político, económico, militar e ideológico (o religioso) en aquel estado extenso y urbanizado, mis colaboradores y yo vamos encontrando pistas en el variopinto material que extraemos y en la planta y arquitectura de las ciudades y poblados que vamos excavando.

Mas los escritos harappeos no han sido del todo inútiles. Aunque nuestra incapacidad de traducir los símbolos que los artesanos inscribieron en los objetos nos ha impedido saber directamente cómo ciertos individuos y comunidades ganaron y conservaron el poder, examinando el contexto en que se usó la escritura, algo vamos vislumbrando. Estas investigaciones, junto con recientes análisis de las avanzadas técnicas artesanas que en Harappa han sobrevivido al paso de los siglos, empiezan a construir una nueva ima-

Resumen/*Las artesanías como indicadores culturales*

- La antigua civilización del valle del Indo, la primera que surgió, en 2600 a.C., en lo que son ahora Pakistán y el oeste de la India, es la menos conocida de las cuatro principales culturas urbanas arcaicas del Mundo Antiguo; las otras tres fueron las de Mesopotamia, Egipto y China.
- No contando con ninguna “piedra de Rosetta” en la que basarse, los lingüistas no han podido descifrar la antigua escritura índica. Para entender la estructura social, económica y política de aquel amplio estado, se han de estudiar abalorios de piedra y otros restos que se van descubriendo.
- Se ha logrado reproducir las técnicas de que se valieron los maestros artesanos para fabricar la gran cantidad de objetos ornamentales, comerciales y rituales que los arqueólogos han ido sacando de las ruinas de las ciudades del Indo. Buscando claves en sus finas artesanías, los arqueólogos pueden irse haciendo al fin una idea aproximada de lo que fue aquella extinguida civilización.

gen de la estructura del poder en la civilización del Indo.

Ciudades ocultas

Por los años veinte, ciertas excavaciones despertaron la atención sobre la civilización del Indo. Los arqueólogos descubrieron bajo antiguos montículos de tierra y desechos dos grandes ciudades de la Edad del Bronce: Harappa y Mohenjo Daro ("Montículo de los Muertos" o "Montículo de Mohen"), sitas en las actuales provincias paquistaníes de Punjab y Sindh. Nadie se esperaba que un importante estado hubiese florecido en las fértiles llanuras regadas por el río transhimalayo. Subsiguientes inspecciones y excavaciones, en el oeste de India y en Pakistán, han descubierto más de 1500 yacimientos dispersos por un área tan extensa como Europa occidental y el doble de grande que Mesopotamia o el antiguo Egipto. Aunque el pueblo que vivió en el valle del Indo no erigió monumentales esculturas de piedra ni enterró a los difuntos con sus ajuares y riquezas, sí construyó grandes y bien planeadas ciudades. Manufacturaba objetos de un lujo exquisito que se comercializaban y exportaban a los mercados del golfo Pérsico, de Asia Central y de Mesopotamia. Las similaridades de la planta de los yacimientos y en el estilo de los artefactos que se hallan por toda la región del Indo reflejan una estructura económica y social sorprendentemente uniforme.

George F. Dales, de la Universidad de California en Berkeley, fundó en 1986 el Proyecto Investigación Arqueológica de Harappa, proyecto multidisciplinar a largo plazo que estoy ahora codirigiendo yo con Richard H. Meadow, de la Universidad de Harvard, y Rita Wright, de la Universidad de Nueva York, en colaboración con el Departamento Federal de Arqueología y Museos de Pakistán. Investigamos en los yacimientos, y también en el laboratorio, para descubrir el emplazamiento harappeo originario y rastrear la evolución de la ciudad que allí emergería. Este trabajo ha revelado varias fases de desarrollo.

Las ciudades del Indo basaron su economía en la agricultura y en la ganadería, complementadas con la pesca y la caza. Tanto el pueblo como las clases superiores obtenían unos ingresos adicionales con la producción y el comercio de artículos, en especial tejidos de algodón o de lana, y una diversidad de productos de artesanía.

El poblado más antiguo establecido en Harappa (la fase Ravi) data de antes del 3300 y llega a alrededor del 2800 a.C., época en que los sumerios edificaban sus primeros zigurats y templos de complicada ornamentación, y los egipcios enterraban a sus gobernantes y amontonaban tesoros en tumbas de adobe. Aprovechando un entorno similar al de los labrantíos del Creciente Fértil de Oriente Medio, los antiguos pobladores de la cuenca del Indo pastoreaban rebaños y cultivaban trigo, cebada, sésamo y legumbres. Gracias a las redes comerciales se fueron difundiendo entre los primeros establecimientos técnicas menestrales. A través de esas vías se diseminaron también por la región símbolos religiosos y estilos de manufactura compartidos.

Se han encontrado otras aldeas de agricultores, a partir de ese período, a lo largo del río Ravi, al norte y al sur de Harappa. Ninguna llegaría a convertirse en una localidad mayor. En la limitada área ya desenterrada de la Harappa del período Ravi, hemos hallado vestigios de la producción de abalorios y ajorcas, tanto de terracota como de piedra. Debían de llevar los de terracota los niños, los plebeyos o ambos, mientras que los más exóticos, de piedra o de conchas marinas, servirían de adorno a las elites locales. Mediante un cuidadoso análisis de las materias primas y comparando las provenientes de distintas regiones, se ha averiguado que algunas de las trabajadas por los primeros artesanos del período Ravi llegaron al yacimiento desde lugares alejados entre 300 y 800 kilómetros. Las impresiones de tejidos en pequeñas cuentas de terracota prueban que hubo producción textil, posiblemente tanto de algodón como de lana.

Este yacimiento del período inicial de Harappa contiene también los primeros indicios de símbolos abstractos o pictográficos incisos en



EDWARD BELL

3. LA CIVILIZACION DEL VALLE DEL INDO, que surgió hará unos 4800 años, llegó a contar con más de 1500 ciudades y establecimientos dispersos por un territorio tan extenso como la Europa occidental, en lo que son hoy Pakistán y el occidente de India.

la cerámica. Los estudios en curso sugieren que algunos de estos símbolos se mantuvieron después al formalizarse la escritura del Indo, de manera muy parecida a como los antiguos símbolos mesopotámicos y egipcios que se ven en cacharros de barro y en tablitas de arcilla de alrededor de 3500 y de 3200 a.C. respectivamente, pasaron luego a figurar en las escrituras cuneiforme y jeroglífica.

Entre el 2800 y el 2600 a.C., Harappa llegó a ser el centro de una próspera economía. Físicamente, se expandió hasta convertirse en una ciudad de un tamaño considerable: dos sectores amurallados cubrían una superficie de más de 25 hectáreas. Entre tanto, surgieron por los alrededores muchas aldeas relacionadas con la urbe. Durante este período, denominado Kot Dijiano (del yacimiento de Kot Diji, al sur), los artesanos desarrollaron nuevas técnicas para producir artículos que se difundieron ampliamente, así ajorcas de barro cocido y lozas (cerámica vidriada); para fabricarlos se necesitaban de ordinario hornos de altas temperaturas (*véase el recuadro* "Los secretos de las técnicas harappeas del vidriado").

Por la misma época se transportaron a Harappa, probablemente en carros de bueyes, o por el río en barcazas de quilla plana, cantidades cada vez mayores de piedra y de otras materias primas. Del mismo período se han hallado en Harappa carritos de bueyes de juguete y ruedas de terracota; el uso posterior de carros y de barcazas está bien documentado. Se han desenterrado figurillas de reses, y algunas humanas, pintadas con lo que parecen ser tejidos, señal del auge de la producción textil y del valor no sólo funcional, sino también ornamental de las vestimentas.

En esta fase emergió un sistema formal de escritura, la escritura primitiva del Indo, como prueba su aparición en muchos fragmentos de cerámica y en las marcas impresas sobre arcilla con sellos. Los comerciantes indicaban quién era el propietario de un almacén o de unos fardos de mercancías marcando con sus sellos unas plaquitas de arcilla, o 'bulas'; les adherían una cuerda o se las ponían a una puerta. Estos sellos, cuadrados y con motivos geométricos o animales grabados en hueco, han servido de documentación económica. Se han descubierto pocos; cabe conjeturar que los usarían individuos o comunidades poderosos: terratenientes, comerciantes y líderes religiosos.

Las excavaciones han sacado a la luz otros indicios de la evolución económica que tuvo lugar durante el período Kot Dijiano. Se ha desenterrado una pequeña pesa cúbica de piedra caliza; sus 1,23 gramos la encajan perfectamente en el sistema de pesas normalizado que se conocería más tarde en las ciudades del Indo. Su hallazgo indica que, dos siglos antes de que se difundiera por el valle del Indo, se estableció en Harappa un sistema que determinaba el valor mediante el peso, posiblemente para el cálculo de tasas o tributos.

Durante los períodos Ravi y Kot Dijiano fueron apareciendo muchos símbolos religiosos —formas humanas con cuernos y dibujos rituales en la cerámica— en Harappa y en lejanos rincones de la región del Indo; indican la propagación y síntesis de las ideas religiosas y culturales. Mientras en Egipto y Mesopotamia la conquista militar logró que las regiones se integraran en estados unificados, no sucedió así con los primeros asentamientos del Indo. Parece ser que los primeros pobladores de Harappa se sustentaban con los ricos labrantíos y praderas regados por el río Ravi, a la vez que fundaban el poder económico y político en la artesanía y en el comercio, para después legitimar su posición gracias a las prácticas religiosas, más que a la guerra.

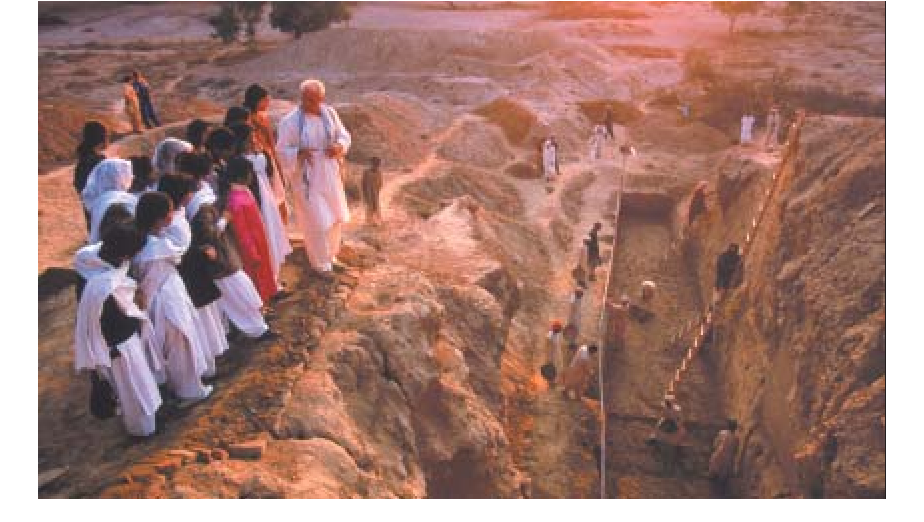
La ciudad florece

La fase plenamente urbana de Harappa ('fase Harappa') comenzó hacia el año 2600 a.C. y se prolongó hasta alrededor de 1900 a.C. Durante siete siglos fue uno de los mayores y más potentes centros económicos del valle del Indo, pese a que, al parecer, no tenía ejército. Durante las temporadas comerciales de la primavera y de finales del verano se alojarían en ella centenares de mercaderes, que atraerían a miles de personas de las zonas rurales cercanas. Según la época del año, puede que vivieran en la ciudad de 40.000 a 80.000 personas. Ricos patronos y la competencia empresarial estimularon el desarrollo de nuevas técnicas y la ampliación de las redes comerciales. Se han encontrado cerámicas típicas, ornamentadas con motivos rituales, en todos los yacimientos



RANDY OLSON *Aurora Photos*

4. PEREGRINOS RELIGIOSOS caminan de ciudad en ciudad por las antiguas rutas comerciales del valle del Indo, elevando preces y llevando las ofrendas de los fieles a un santuario lejano.



5. POCO A POCO los arqueólogos paquistaníes van descubriendo las que fueron imponentes murallas de la antiquísima ciudad de Harappa, mientras J. Mark Kenoyer (*a la derecha, delante del grupo*) explica a unos visitantes la significación del yacimiento.

RANDY OLSON *Aurora Photos*

existentes a lo largo del valle entero del Indo, junto a pesas cúbicas de piedra y sellos grabados con escritura índica y un motivo que representa un unicornio mitológico.

Aunque la mayoría de los comerciantes actuaban en la región del valle del Indo, de algunas materias sólo se podía disponer trayéndolas de lugares más lejanos. La presencia de materias primas y de objetos acabados procedentes de Afganistán y de Asia Central indica que desde esas zonas llegaban a la ciudad mercaderes con lapislázuli, estaño, oro, plata y, quizá, finos tejidos de lana. Los mercaderes, al volver hacia las tierras altas, llevarían a su vez a éstas cereales y ganado, así como finas piezas de algodón y posiblemente hasta sedas, géneros que no se conservan bien con el paso del tiempo. Otros artículos no perecederos procedentes del valle del Indo —largos y elegantes abalorios de cornalina (una especie de ágata roja), ajorcas de concha— han sido desenterrados en Asia Central y en Mesopotamia.

En el apogeo de su florecimiento, Harappa ocupó una superficie de más de 150 hectáreas; su perímetro, que pasaba de los cinco kilómetros, abarcaba tres grandes montículos elevados y los suburbios asociados. La ciudad moderna de Harappa, con cerca de 20.000 habitantes, ocupa sólo un tercio del antiguo emplazamiento. La arquitectura de la ciudad y el plano de sus calles se organizaron para facilitar el acceso a los distritos y separar las zonas privadas de las públicas. Enormes murallas de adobe rodeaban cada uno de los montículos (*véase la figura 5*), a los que se accedía por estrechas puertas, que los carros de bueyes sólo podían atravesar de uno en uno. Los albañiles empleaban ladrillos cocidos para construir casas de varios pisos sitas en calles que se cruzaban de norte a sur y de este a oeste, dibujando una rejilla. Las calles mayores tenían más de ocho metros de anchura, y en algunas de ellas había divisorias centrales que debían de servir para regular el tráfico de carros y carretas.

Los constructores abrieron pozos de agua potable dentro de la ciudad y en sus cercanías. Los hogares harappeos estaban equipados con baños, letrinas y albañales. Empalmaban estos últimos a cloacas mayores, que desembocaban fuera de las murallas de la ciudad; el alcantarillado de Harappa alejaba así de las zonas habitadas las aguas residuales y depositaba fértil cieno en los campos de labranza de alrededor. Salvo las ciudades del Indo, no hubo en el mundo antiguo urbe alguna que dispusiese de tan refinado sistema de aguas potables y residuales. En el propio Imperio Romano, unos 2000 años después, sólo contaban con estos servicios los barrios de la clase alta.

Durante este período, los escribas desarrollaron un complejo sistema de escritura, con más de 400 símbolos, que la elite social —mercaderes, propietarios de tierras y encargados de los ritos— empleaba como mecanismo de control de la economía y de conservación del poder. No conocemos la lengua para la que se desarrolló tal escritura, aunque debió de emplearse más de una lengua, como ocurrió en Mesopotamia. No lo conoceremos hasta que se descubra alguna tablilla bilingüe (una piedra de Rosetta índica) que permita descifrar el código del sistema de escritura.

Esta forma de escribir se difundió por los principales centros urbanos del valle del Indo. Se usó sobre todo en sellos, que también llevaban grabados motivos animales y objetos rituales. La imagen del unicornio (*véase la figura 2*) es la más común (se halla en más del 65 % de los sellos conocidos), pero también aparecen elefantes, cebúes, búfalos, bisontes, tigres y rinocerontes. Puede que los símbolos animales representaran a clanes importantes o a determinadas categorías sociales; probablemente la escritura se utilizaría para registrar el nombre de los propietarios y sus títulos legales. Que el signo del unicornio aparezca tanto indica la existencia de un grupo extenso y poderoso, de mercaderes quizá.

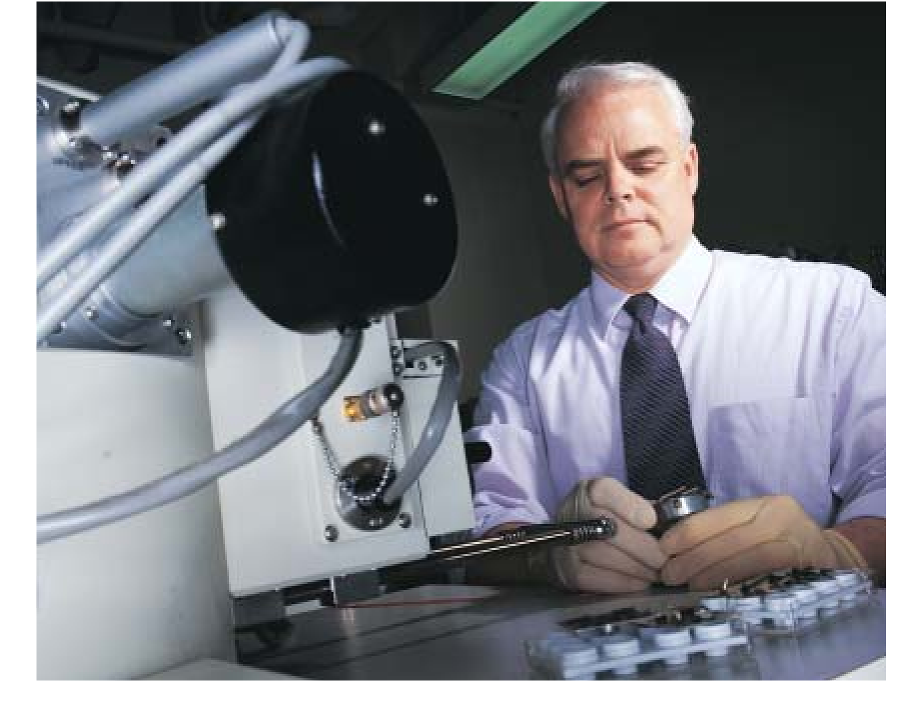
Además de sellos grabados con escritura y con signos animales, se han recuperado grandes vasijas de cerámica que debieron de usarse para almacenar género o llevarlo al mercado. Incisos en ellas se distinguen unos trazos que quizá fuesen los nombres de sus dueños o consignatarios, o bien la descripción de los contenidos. Se han interpretado como nombres de personas o como valoraciones algunas muestras de escritura incisas en utensilios de bronce y en joyas de oro.

También vemos por primera vez fichas o tablillas de esteatita con grabados de escritura y símbolos.

El autor

JONATHAN MARK KENOYER es profesor de antropología en la Universidad de Wisconsin en Madison, donde enseña arqueología, etnológica y experimental, y tecnología antigua. Su atención se centra en la civilización del valle del Indo, donde ha dirigido excavaciones durante los últimos 27 años. Kenoyer es doctor por la Universidad de California en Berkeley.

Como muchas de estas piezas contienen el mismo tipo de signos y lo que parecen ser números, se piensa que se utilizarían para llevar la contabilidad. Puede que la escritura indicase el nombre del propietario, o el de un producto y su cantidad, o el de un acreedor. Tablillas parecidas, hechas de arcilla o de loza, estampadas con un sello, se encuentran muy a menudo en los estratos superiores del yacimiento. Algunas fueron partidas en dos intencionadamente, tal vez para indicar un contrato entre dos partes, cada una de las cuales conservaría una de las mitades hasta que se completase la transacción o el trabajo. Unas características tablillas de cobre con escritura y motivos animales, y su amplio uso en Mohenjo Daro y en Harappa, quizá sean la prueba más antigua de que en las ciudades del valle del Indo se acuñaba moneda.



6. LAS MARCAS dejadas por un instrumento se hacen visibles cuando el autor examina antiguos artefactos del valle del Indo con un microscopio electrónico de barrido en la Universidad de Wisconsin en Madison.

DAVID NEVALA

Nuestro descubrimiento, en 2001, de un taller de Harappa en el que se manufacturaban sellos y tablillas grabadas, combinado con los hallazgos obtenidos durante los últimos 16 años de excavaciones en ese yacimiento, ha proporcionado una nueva cronología del desarrollo de la escritura índica. Antes se juntaban en un mismo grupo todos los sellos y tablillas; ahora, demostramos que en tiempos diferentes se fueron produciendo distintos tipos de sellos y de tablillas, y que en el transcurso de los años quizá cambiase hasta la escritura. Estamos tratando de esbozar una seriación de la datación de los cambios de la escritura, y esperamos que esta cronología revolucione los intentos de desciframiento.

Entre los años 2300 y 1900 a.C. se expandieron las poblaciones urbanas del valle del Indo; los ornamentos, utensilios y técnicas manufactureras se fueron diversificando cada vez más. Los arqueólogos creemos que estos cambios estilísticos reflejan dos procesos opuestos: por un lado, el deseo de diferenciar en las ciudades clases y comunidades y, por otro, los intentos de integrar estos grupos diferentes mediante la promoción de una ideología común.

En este período vemos que la escritura se combina con escenas mitológicas: se relaciona ahí con lo religioso. Parece muy probable que los líderes espirituales se sirviesen de los sellos y tablillas para comunicar al pueblo llano los nombres de divinidades y ritos. Aunque ignoramos los nombres de los dioses índicos, vemos repetirse el motivo de una figura masculina sedente, en postura de yoga y con tocado de cuernos. En una serie de escenas, se sacrifica un búfalo ante dicha deidad; en otras, ésta aparece rodeada de animales salvajes. También se encuentran figuradas en los sellos deidades femeninas, algunas tocadas de cornamenta y luchando con un tigre. Tema frecuente en muchos sellos, e impreso asimismo en tablillas de arcilla, es el de una deidad que estrangula a dos tigres; a veces se la ve a lomos de un elefante. Una escena parecida hallada en Mesopotamia guarda relación con el poema épico de Gilgamés, en el que el héroe estrangula a un par de leones. Las similaridades entre estos motivos son prueba de que se compartieron concepciones de poder y dominación, pero ignoramos si un relato concreto fue pasando de una región a otra.

A medida que Harappa fue acogiendo a más gentes llegadas de tierras extranjeras, es probable que las clases privilegiadas creyesen necesario fomentar la legitimación de su hegemonía mediante ceremonias y ritos públicos que reforzaran las tradiciones religiosas. Con tal finalidad, en Mesopotamia y en el antiguo Egipto los dirigentes políticos y religiosos construyeron imponentes murales de piedra o de ladrillo cubiertos de propaganda religiosa y política que los representaba como conquistadores de sus enemigos. En el valle del Indo no se ha encontrado ningún artificio similar.

Cambios en la cultura del Indo

Los especialistas sostenían antes que las ciudades del Indo fueron abandonadas de repente, hacia 1750 a.C., pero nuestros recientes trabajos en Harappa han demostrado con claridad que estuvo habitada durante una última fase, del 1900 al 1300 a.C. Los indicios de que no se conservaron ni los desagües ni las murallas de la ciudad dan a entender también que hubo hacinamiento y una quiebra del orden ciudadano. Los restos sugieren que las elites dirigentes no fueron ya capaces de controlar el funcionamiento cotidiano del centro de la urbe. Esta pérdida de autoridad debió de obligar, al fin, a una reorganización social, no precisamente en Harappa, sino en toda la región que durante 700 años había sido dominada por esas clases altas. Cambios parecidos se fue-

Qué dicen los abalorios

NUESTRAS EXCAVACIONES en Harappa han sacado a la luz abalorios de piedra pertenecientes a todas las fases principales de ocupación del lugar. Sus habitantes los manufacturaron desde el primer asentamiento en adelante. Otros indicios, en especial unas figurillas que representan habitantes de la ciudad engalanados con joyas, revelan que los harappeos se adornaban a menudo con collares de piedras coloreadas, en las que se pintaban patrones decorativos. Es probable que algunas de las zonas donde fabricaron abalorios descubiertas por nosotros estuviesen patrocinadas por la elite urbana y que allí se produjesen raros collares de difícil factura como símbolos de riqueza, categoría social y poder.

Basándonos en especímenes inacabados y en restos de talleres, hemos podido documentar la evolución, a lo largo de 1400 años, del estilo de los abalorios y las técnicas para perforar las cuentas. Esta continua elaboración sería probablemente estimulada por la competencia entre talleres, por la demanda y por los incentivos con que ricos patronos promoverían la creación de galas más valiosas y atractivas.

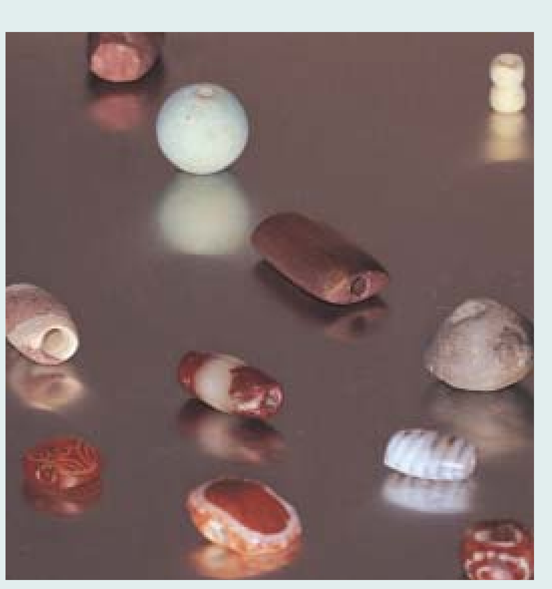
Ya en la fase 'Ravi', la más antigua (3300-2800 a.C.), fue muy deseada la posesión de abalorios de alta calidad, que requerían métodos de fabricación refinados. Aunque hacerlos ensartando piedras grandes es bastante sencillo, los tipos que más abundan durante aquel período son los de cuentas pequeñísimas, de entre 1,5 y 3 mm de diámetro y uno o dos milímetros de longitud. Fabricarlas era especialmente difícil, pues para que se las pudiese ensartar había que perforarles un agujero diminuto (de un diámetro de medio o tres cuartos de milímetro).

Algunas de las cuentas de collar más antiguas eran de esteatita, mineral blando. Los arqueólogos hemos recobrado más cuentas de esteatita que de cualquier otro material; en Harappa se las encuentra por doquier, datables desde la fase Ravi hasta la Harappea Final (1900-1300 a.C.). Los artesanos perforaban fácilmente las cuentas de esteatita de toscas formas con taladros de cobre o incluso con espinas de acacia endurecidas, que aguzaban para que su grosor no pasase del medio milímetro de diámetro. A continuación igualaban el tamaño de las cuentas y las pulían frotándolas sobre piedras areniscas. Por último, las introducían en hornos hasta que el mineral, al blanquearse, adquiría una forma más consistente y duradera.

Los artesanos dejaban algunas cuentas de esteatita sin pulir, para tapar luego su rugosa superficie con una frita de sílice (pasta vítrea hecha con polvos de cuarzo) finamente molida, que, mezclada con óxido cúprico y calentada en el horno, producía un vidriado azul-verdoso. Si se los calienta a más de 850 grados, los cristales de esteatita desprenden el agua y se transforman en minerales mucho más duros, entre ellos la cristobalita, la enstatita y la alúmina. Muchos artífices de la región del Indo practicaron este tipo de transformaciones, que quizá sirvieran de fundamento para los procesos que más adelante se siguieron en la fabricación de adornos, sellos y tablillas de loza.

Desde la fase Ravi hasta la plenamente urbana, los que fabricaban abalorios en Harappa y en otras poblaciones del Indo trabajaban también piedras más duras, tales como ágatas y jaspes, para cuya perforación se requerían otras técnicas: primero había que ir picándolas con utensilios de piedra o de cobre; a continuación se las horadaba con un taladro de mineral más duro. Los estudiosos de la cultura del Indo no han logrado reproducir la técnica de picado, por lo que no se sabe bien en qué consistía. Pero sí se sabe que los trabajadores perforaron algunas cuentecillas con taladros que hacían dando a finas láminas de piedra la forma de cilindros largos y aguzados. A estas brocas se les ponía como mango una clavija de madera, a la que se hacía girar con una anilla; horadaban por un lado la cuenta hasta la mitad de su grosor y por el otro lado igual, de forma que quedase perforada por completo para que la atravesase el hilo que las ensartaría. Se trataba de un proceso lento y pesado, pues los pétreos taladros y las cuentas eran más o menos igual de duros.

Hacia el 2600 a.C., los artesanos del Indo encontraron para sus taladros un mineral mucho más duro que nosotros hemos llamado ernestita en honor del arqueólogo inglés Ernest J. H. Mackay, quien lo descubrió en Chanhu Daro, Pakistán. Estos eficacísimos taladros tienen aún algo de misterioso, y a pesar de numerosos estudios e inspecciones todavía no hemos podido averiguar cuál es su composición, ni tampoco de qué zona proceden. La ernestita consta, al parecer, de varios minerales; unos análisis preliminares sugieren que es una roca metamórfica de grano fino compuesta principalmente de cuarzo, sillimanita (llamada también fibrolita), mullita, hematita y óxido de titanio. La mullita es raramente hallada en forma natural, pero está presente en materiales cerámicos modernos sometidos a altas temperaturas. Su ocurrencia en los taladros hace pensar que es un subproducto del intencionado calentamiento de la roca original, proceso éste que los artífices harappeos practicaron mucho para endurecer la esteatita y sacar con más facilidad esquirlas de otras piedras.



LOS MAESTROS ARTESANOS del Indo se valieron de complicadas técnicas para esmerilar, perforar y decorar según la moda, convirtiéndolos en preciosos abalorios, minerales y piedras de colores traídos de muy lejos.

Aunque no sabemos dónde se fabricaron los primeros taladros de ernestita, hasta ahora sólo se los ha encontrado en yacimientos del valle del Indo, lo que da pie para suponer que únicamente los hubo en esa región. Gracias a ellos pudieron elaborar allí los artesanos preciosos abalorios de cornalina que llevarían con ostentación las elites del Indo y serían también vendidos a poblaciones del Asia Central y de Mesopotamia, Ur incluida. Los largos abalorios de cornalina se llevaban a menudo como un cinturón de muchas vueltas, sujetas con pulidas piezas de bronce.

Los fabricantes harappeos de abalorios usaron taladros de ernestita durante siete siglos, pero hacia 1900 a.C. esta técnica desapareció en los lugares norteños, quizás a causa del deterioro de las redes comerciales que se produjo por entonces.

Pero no se dejó de taladrar cuentas. Más tarde, los artesanos perforarían la piedra valiéndose de taladros huecos y tubulares de cobre, combinados con sustancias abrasivas. Este procedimiento lo habían empleado siempre los harappeos para vaciar anillos de piedra y vasijas de alabastro, pero luego miniaturizaron la técnica, trabajando con taladros tubulares finísimos, de tan sólo un milímetro de diámetro. Aunque no eran tan eficaces como los de ernestita, con los taladros de cobre se podían perforar cuentecillas de piedra bastante dura horadando por cada lado la mitad del grosor.

DAVID NEVALA; PROYECTO DE INVESTIGACION ARQUEOLOGICA DE HARAPPA Y DEPARTAMENTO DE ARQUEOLOGIA Y MUSEOS, GOVIERNO DE PAKISTAN

Los secretos de las técnicas harappeas del vidriado

LA DE LA LOZA, CERAMICA o piedra vidriada, de terso y brillante aspecto, es una de las técnicas complejas que a lo largo de la historia de Harappa emplearon sus artesanos para crear artículos de gran calidad destinados a las clases altas. La loza del valle del Indo era más fuerte que la de Egipto o la de Mesopotamia porque se hacía con cuarzo semifundido, que se volvía a triturar hasta convertirlo en una pasta fina antes de que una segunda cochura fundiera el polvo vítreo con el cuerpo del objeto. Los artesanos índicos necesitaban una loza más fuerte porque con ella hacían objetos diferentes —las ajorcas, por ejemplo— de los de otros países. También producían diminutas cuentas vidriadas y tablillas con símbolos escritos, delicadamente moldeadas; debían de utilizarlas como instrumentos de crédito, o bien para llevar las cuentas de las mercancías que entraban o salían de las ciudades.

En Harappa, las clases superiores emplearon la loza no sólo para la decoración y para el comercio, sino también con fines rituales. Las tablillas con episodios representados tal vez fuesen fabricadas para ceremonias especiales; quizá las recibiesen los participantes que hubiesen ofrecido dones o sacrificios. Controlar las técnicas de producción y la fabricación de las piezas de loza les sería esencial a las elites de Harappa, si querían conservar los símbolos de su poder y su elevada posición.

Aunque los materiales con que se producía la loza eran fáciles de obtener, su elaboración hasta convertirlos en artículos terminados requería técnicas muy especializadas. Los artesanos fundían parcialmente en hornos de alta temperatura el cuarzo molido mezclado con arena añadiéndole fundentes (sustancias que facilitan la fusión) hechos de cenizas de vegetales; creaban así una frita vidriosa; luego molían de nuevo esta frita y volvían a hornearla a la temperatura de unos 940 ºC para crear una densa loza vidriada. Cuando a la frita se le añadía óxido de cobre o azurita (carbonato hidratado de cobre), las piezas resultantes parecían ser de turquesa o de lapislázuli y había mucha menos probabilidad de que destiñeran al llevarlas rozando la piel en un clima cálido y húmedo.



LA PRODUCCION de piedras y cerámicas vidriadas o loza fina requirió que los artesanos índicos desarrollaran sofisticadas técnicas de cocción y de horneadura. Se añadían oxidados minerales cúpricos para colorear de azul el sílice vidriado (*centro*) de modo que pareciese turquesa o lapislázuli de gran valor.

Los arqueólogos han encontrado restos de piezas de loza en todos los niveles de los yacimientos de diversas partes de Harappa, pero durante 70 años no se habían podido localizar los hornos en que las fabricaron. Nuestro descubrimiento, en 2001, de un pequeño taller cerámico puso de manifiesto que se había estado buscando un tipo de horno equivocado. Ese hallazgo vino a ser como dar con la cueva de los tesoros de Harappa, pues en aquel taller se habían fabricado también tablillas de esteatita, abalorios y otras piezas de ornato, objetos todos ellos de lujo.

La penosa excavación y ulterior clasificación de los centenares de artefactos producidos en aquel taller nos permitieron reconstruir algunos de los procesos que se siguieron en la fabricación de los abalorios, ajorcas y tablillas. Para producir las moldeadas tablillas de cerámica, los artífices dividían primero toscas masas de esteatita hasta convertirlas en delgadas láminas, que luego apretaban contra el reverso de figuras para hacer moldes. Con estos moldes daban forma a unas tablillas, que se colocaban en recipientes de un barro hecho de arena y una mezcla de arcilla y paja que no se derretiría a las altas temperaturas necesarias para vidriar. En evitación de que las tablillas vidriadas u otros objetos se pegaran al recalentado barro del recipiente, la cara interna de éste se recubría con una gruesa capa de blancos polvos de hueso calcinado y, a veces, de esteatita triturada.

En la reducida área del taller no se descubrió ningún horno, aunque sí encontramos grandes cantidades de carbón vegetal, espumosas escorias vítreas de una cerámica verdeamarillenta y recipientes de cocción rotos. Tras haber examinado con detenimiento los recipientes y los vitrificados soportes que los sostuvieron durante las cocciones, empecé a sospechar que los artesanos recurrían a un procedimiento de cocción inédito. Con la ayuda de mis estudiantes de doctorado, pude someter exitosamente a prueba tal procedimiento mediante una reconstrucción experimental realizada en la Universidad de Wisconsin en Madison durante el verano de 2001.

Al parecer, los vidriadores de cerámica harappeos juntaban dos recipientes de cocción para formar un minihorno, en vez de servirse de mayores y más corrientes estructuras. Calentando aquellos dos receptáculos en un fuego al aire libre, podrían alcanzar temperaturas suficientes para vidriar objetos pequeños. En mi experimento reproduje la pasta de loza y los recipientes y moldes valiéndome de instrumentos parecidos a los que antiguamente usaran los harappeos. Introdujimos las moldeadas tablillas de loza precocida y otros objetos de prueba, entre ellos los moldes de esteatita, en el recipiente, y lo cubrimos con una tapadera. Insertamos luego unas cuñas que mantuviesen un poco alzada la tapadera y dejaran un resquicio por el que las llamas pudiesen entrar en esa cámara de cocción en miniatura. Coloqué el recipiente sobre un montoncito de leña, lo cubrí con más leña y encendí el fuego, echándole más combustible para mantener el conjunto al rojo.

Al cabo de unas tres horas de cocción, los objetos de loza, apenas visibles por la rendija entre la tapadera y el borde del recipiente, empezaron a ponerse de un color rojoanaranjado oscuro y a emitir un olor característico. Con un termopar dotado de un pirómetro digital pudimos percatarnos de que la temperatura de cocción era de unos 935 ºC, el punto crítico de vidriación de la loza harappea. Mantuvimos esta temperatura cerca de una hora añadiendo leña al fuego.

Una vez enfriado el minihorno, mis alumnos y yo nos reunimos en torno a él para observar los resultados. Nos encontramos unas tablillas y unos abalorios de loza enteramente vidriada, aunque no idéntica a la de los objetos creados por los maestros artesanos de Harappa. Este primer intento nuestro indica que la técnica del recipiente a modo de horno habría sido muy eficaz para la producción de loza y objetos de esteatita cocida. Y lo que aún es más importante: los residuos del proceso —un montón de carbón vegetal y cenizas, un recipiente que se rompió al cocer, unas pocas cuñas esparcidas, un hueso carbonizado y algunos abalorios y tablillas rechazados — se parecían muchísimo a cuanto habíamos encontrado en el taller de Harappa.

DAVID NEVALA; PROYECTO DE INVESTIGACION ARQUEOLOGICA DE HARAPPA Y DEPARTAMENTO DE ARQUEOLOGIA Y MUSEOS, GOVIERNO DE PAKISTAN

7. PESAS DE PIEDRA que los comerciantes de Harappa emplearían para pesar en los mercados urbanos las mercancías.



RANDY OLSON *Aurora Photos*; PROYECTO DE INVESTIGACION ARQUEOLOGICA DE HARAPPA Y DEPARTAMENTO DE ARQUEOLOGIA Y MUSEOS, GOVIERNO DE PAKISTAN

ron produciendo en las demás ciudades grandes, así en Mohenjo Daro, al sur, y en Dholavira, en la zona occidental de la India.

La crisis llevó al cese de las marcas distintivas de la cultura de la elite índica. Desapareció la cerámica adornada con motivos rituales y con escrituras; también los sellos cuadrados con unicornios y otros motivos zoomorfos. Cayeron en desuso las pesas cúbicas que se habían empleado para la tasación y el comercio. Se fueron deteriorando las redes internacionales. No se transportaban ya las conchas de las regiones costeras hasta las poblaciones del norte, y el norteño lapislázuli no llegó más a las llanuras del sur. En Mesopotamia, los textos dejaron de registrar un comercio continuo con una región llamada Meluhha, que era probablemente el valle del Indo.

Parece que el declinar y el reorganizarse de la civilización del Indo no se debieron a una sola causa, sino a una serie de factores. El auge del comercio y la expansión de establecimientos índicos por las llanuras de la cuenca del Ganges y el actual estado de Gujarat, en la India occidental, extendieron demasiado el sistema político y económico del Indo. Hacia 1900 a.C., uno de los mayores ríos del valle del Indo, el Ghaggar-Hakra (llamado también Saraswati), fue cambiando de curso y finalmente se secó, dejando a muchas localidades sin un recurso imprescindible. Aquellas comunidades debieron de emigrar a otras zonas agrícolas, o a ciudades como Mohenjo Daro y Harappa, resultando de ello el hacinamiento y el desorden en las urbes. Sin una tradición de integración social impuesta por el ejército, los líderes no disponían de mecanismos para conservar las redes comerciales y controlar el movimiento de las poblaciones que se esparcían por nuevas tierras.

La rapidez del cambio varió según las zonas, pero del 1300 al 1000 a.C. apareció en el norte del valle del Indo, y en la región del Ganges, al este, un nuevo orden social, caracterizado por una ideología y una lengua propios. Según la antigua literatura hindú —los Vedas, los poemas épicos Mahabharata y Ramayana—, esa zona fue poblada por numerosos entes políticos que competían entre sí, practicaban la religión védica y hablaban lenguas indo-arias, como el sánscrito y sus varios dialectos. Dificulta nuestro conocimiento el hecho de que la mayor parte de los establecimientos índicos que datan de este período hayan sido destruidos por la erosión o la reutilización de los ladrillos, cuando no cubiertos por una continua habitación que imposibilita las excavaciones. Tanto Harappa como Mohenjo Daro soportaron posteriores asentamientos que datan de dicha época, pero los estratos correspondientes están muy perturbados.

Aunque muchos rasgos de la cultura de las elites del Indo se borraron, algunos aspectos de su urbanismo y las importantes técnicas artesanales sobrevivieron. En la región del Indo se siguieron produciendo cerámica, loza, cobre y bronce, aunque de maneras adaptadas a los cambios de las materias primas y de las necesidades sociales. La primera prueba de que en Harappa se produjeron abalorios de vidrio se remonta al 1700 a.C, unos 200 años antes de que se fabricase vidrio en Egipto. Durante la subsiguiente cultura de la Cerámica Gris Pintada (1200-800 a.C.) se fabricaron botellas, ajorcas y abalorios de vidrio en todo el norte de la India y en Pakistán. También fue entonces cuando comenzó la producción del hierro, una nueva técnica que no tardó en propagarse por el norte del valle del Indo y por la región del Ganges. Aunque durante este período los pueblos de Anatolia y del Asia occidental fundían el hierro, la producción de hierro en la antigua India y en Pakistán constituyó un fenómeno distinto, sin relación con lo que se hacía más al oeste.

Bibliografía complementaria

EXCAVATIONS AT HARAPPA 1994-1995: NEW PERSPECTIVES ON THE INDUS SCRIPT, CRAFT ACTIVITIES, AND CITY ORGANIZATION. Richard H. Meadow y Jonathan Mark Kenoyer, en *South Asian Archaeology 1995*. Dirigido por Bridget Allchin y F. Raymond Allchin. Oxford & IBH, Nueva Delhi, 1997.

ORIGINS OF A CIVILIZATION: THE PREHISTORY AND EARLY ARCHAEOLOGY OF SOUTH ASIA. F. Raymond Allchin y Bridget Allchin. Viking Penguin, Delhi, 1997.

TRADE AND TECHNOLOGY OF THE INDUS VALLEY: NEW INSIGHTS FROM HARAPPA, Pakistan. Jonathan Mark Kenoyer, en *World Archaeology*, vol. 29, n.º 2, págs. 262-280; 1 de octubre, 1997.

ANCIENT CITIES OF THE INDUS VALLEY CIVILIZATION. Jonathan Mark Kenoyer. Oxford University Press, Karachi, 1998.

THE INDUS VALLEY MYSTERY. Richard H. Meadow y Jonathan Mark Kenoyer, en *Discovering Archaeology*, vol. 2, n.º 2, págs. 38-43; abril de 2000.



GRANT DELIN

Cerebro y bomba corazón-pulmón

En lo que ha llegado a ser un procedimiento rutinario, la máquina corazón-pulmón "respira" en lugar del paciente durante las operaciones de derivación coronaria. Pero, ¿puede tener un lado oscuro esta máquina, vital para el paciente?

Bruce Stutz

Lo último que recuerdo es la estancia fría con su techo de acero inoxidable. Estaba a punto de ser sometido a una operación a corazón abierto, una experiencia que comparten cada año alrededor de 500.000 personas en los Estados Unidos. Después de que la anestesia ejerciera su efecto, los cirujanos realizaron una incisión en mi ingle para exponer la vena y la arteria femorales. A través de la vena femoral introdujeron una cánula en la aurícula derecha, cavidad situada en la parte superior de mi corazón. La cánula, junto con otro tubo colocado en la arteria femoral, fueron conectados a una bomba de derivación (bypass) cardiopulmonar, también conocida como bomba de oxigenación o máquina corazón-pulmón. Una dosis de heparina evitó que mi sangre se coagulase cuando circulaba a través de los circuitos de la máquina.

La sangre venosa se enfriaba a su paso a través del oxigenador, para prevenir lesiones en los tejidos. Mi temperatura corporal descendió a 25 ºC, en realidad un estado de hipotermia profunda.

Los cirujanos colocaron una pinza ("clamp") inflable en mi aorta para ocluir su luz. Dos litros de una solución fría de potasio pararon mi corazón. Durante las dos horas siguientes fue la máquina la que se hizo cargo de mi función cardiopulmonar. Una incisión de unos 18 cm realizada por debajo de mi mama derecha permitió a los cirujanos introducir cámaras e instrumentos entre mis costillas y reparar mi válvula cardíaca que tenía defectos congénitos.

Se me dio de alta una semana más tarde. La herida de la incisión cicatrizó rápidamente. No me dolía. En un par de semanas pude salir de casa para dar paseos cada vez más largos. Al cabo de un mes volví al gimnasio. Sin embargo, mentalmente me encontraba un poco espeso, algo desconectado y, a veces, incluso desorientado. Pronto percibí que la advertencia de los médicos —"durante algún tiempo se sentirá algo deprimido"— no se correspondía con esta larga y sorprendente lucha contra lo que parecía ser el súbito comienzo, a mis 51 años de edad, de un trastorno por déficit de atención o de una incipiente senilidad. Flotaba desorientado en una tierra de nadie y mi estado de ánimo cambiaba de quejoso a desesperanzado. No podía conseguir el grado de concentración necesario para analizar el problema. Lo que deseaba era ser capaz de pensar. Pensar en algo.

Entonces no lo sabía, pero lo que en realidad estaba sufriendo era lo que los cirujanos denominan "cerebro de la bomba" ["pumphead"] para designar el estado de estupidez en el que los pacientes pueden caer después de haber estado conectados a una bomba corazón-pulmón para realizar una intervención quirúrgica a corazón abierto o, como en mi caso, la reparación de una válvula cardíaca. Otros síntomas son vacíos en la memoria, dificultades en el trato social y cambios de personalidad.

De la posible existencia del "cerebro de la bomba" se sospechó hace ya tiempo, aunque a partir de casos anecdóticos. Sólo recientemente un estudio de seguimiento de cinco años en pacientes que habían sido sometidos a operación de bypass coronario puso de manifiesto que, después de una recuperación inicial de la capacidad mental en los primeros meses, este trastorno postoperatorio a menudo empeoraba y persistía durante años.

¿Sería la bomba corazón-pulmón —que anualmente proporciona el oxígeno a la sangre para mantener la vida durante unas 900.000 operaciones de bypass coronario— la responsable de esta secuela postoperatoria?

La construcción de la máquina corazón-pulmón

Hace cincuenta años John Heysham Gibbon, Jr., de la facultad Jefferson de medicina en Filadelfia, realizó con éxito la primera intervención quirúrgica con una máquina corazón-pulmón. Había iniciado el desarrollo de la máquina allá por los años treinta, cuando era becario en investigación quirúrgica de la facultad de medicina de la Universidad de Harvard. Después de años de ensayos en animales, y con asesoramiento ingenieril y financiación de Thomas J. Watson, presidente de IBM, y de otros, Gibbon resolvió lo que era el principal obstáculo de la cirugía cardíaca: que los cirujanos dispusieran de más tiempo para realizar la operación.

Antes de que comenzara a utilizarse la bomba de Gibbon, el enfriamiento del cuerpo del paciente reducía su metabolismo y la circulación de la sangre y permitía a los cirujanos disponer de una “ventana” de quince minutos para llevar a cabo su trabajo. Si este tiempo se prolongaba, el cuerpo en general, y de modo especial el cerebro, sufrían las consecuencias de la falta de oxígeno.

La máquina de Gibbon recibe la sangre que, en situación normal, va hacia el corazón y los pulmones, la oxigena y la bombea al sistema arterial a través de la aorta. Hoy el uso de esta bomba corazón-pulmón es un hecho habitual. Los cirujanos realizan tantas operaciones de bypass en las arterias coronarias —conocidas en inglés con las siglas CABG, por “coronary-artery-bypass-graftings”— que en su jerga se refieren a estas intervenciones como “cabbages” (coles). Transcurrieron, sin embargo, decenios sin que sus efectos a largo plazo sobre la capacidad mental merecieran un estudio serio.

Esta situación ha cambiado. En el año 2001, en un artículo publicado en *New England Journal of Medicine*, firmado por Mark F. Newman, jefe del departamento de anestesiología del hospital clínico de la Universidad de Duke, se reveló que, incluso transcurridos 5 años, muchos pacientes que habían sido sometidos a una operación de bypass coronario aún se enfrentaban a graves déficits mentales.

La investigación precedente se había limitado a seguimientos de poco más de seis meses. Los cirujanos habían empleado adjetivos tales como “sutil”, “transitorio” y “subclínico” para describir el declive cognitivo que ocurría tras una operación de bypass coronario, “pero tales calificativos minusvaloraban la importancia de dichos trastornos para los clínicos, los enfermos y sus familias”, concluía el citado artículo. Apostilla ahora Newman: “Durante el mes transcurrido desde la aparición del artículo recibimos 4000 correos electrónicos de pacientes a los que se les habían practicado operaciones de bypass coronarios. Muchos de estos pacientes se alegraron de saber que no estaban locos”.

En su estudio, Newman y su grupo utilizaron cinco tests para valorar la capacidad cognitiva —rememorar una breve historia, repetir series de números, retener visualmente una imagen, emparejar dígitos con símbolos y conectar series de números y letras— en una serie de 261 pacientes operados de bypass coronario, la semana antes de la hospitalización, la semana siguiente a la operación, transcurridas seis semanas y de nuevo seis meses más tarde. Después de la operación de bypass, el 53 % de los pacientes se mostraban incapaces de igualar sus resultados con los obtenidos preoperatoriamente con la misma batería de tests. Seis semanas más tarde, el 36 % de los operados mantenía el déficit cognitivo, porcentaje que descendía al 24 % transcurridos seis meses.

Estos resultados no constituyeron sorpresa alguna. Desde el comienzo de la aplicación de la máquina corazón-pulmón se había ido recopilando información en la literatura médica sobre el declive de la capacidad mental a corto plazo después de operaciones en las que se utilizaba la máquina; declive que se atribuía al traumatismo general que representaba la operación. Sin embargo, cinco años después de la primera ronda de tests cognitivos, Newman volvió a examinar a los pacientes. Había quienes recuperaron la capacidad mental previa a la intervención; pero en un 42 % los resultados fueron tan pobres —después de controlar el déficit que podría esperarse asociado al incremento de edad—, los clasificó entre los afectados de un déficit cognitivo.

¿Quién tiene la culpa?

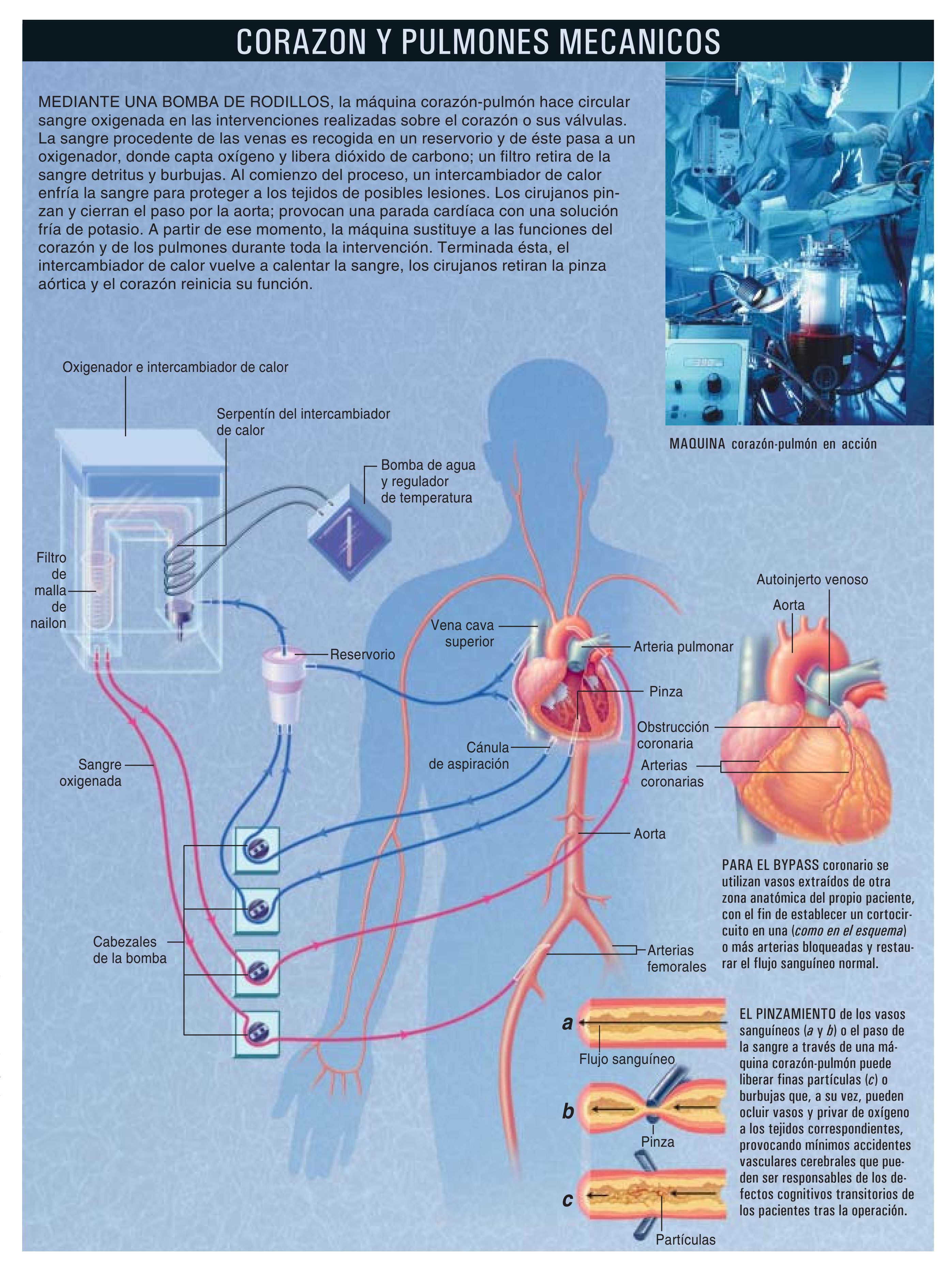
Aunque la hipótesis no ha sido demostrada, la máquina corazón-pulmón es sospechosa, por varias razones, de este declive de la capacidad cognitiva. Se ha especulado que la máquina podría causar lesiones cerebrales al modificar el flujo sanguíneo o al liberar en la corriente circulatoria partículas de

Resumen/*Declive cognitivo*

- La máquina corazón-pulmón, introducida en el año 1953, revolucionó la cirugía coronaria. Permitió que los cirujanos contaran con más de una hora para operar en un corazón parado. Hasta entonces, los medios técnicos sólo posibilitaban hacerlo durante 15 minutos.
- Desde que se inició la aplicación clínica de la máquina, algunos pacientes han experimentado un declive de la capacidad cognitiva. Creíase que este trastorno, conocido en la jerga quirúrgica como “cerebro de la bomba”, era transitorio. Solía atribuirse al traumatismo general de la intervención.
- Recientemente, sin embargo, la investigación a largo plazo ha demostrado que los pacientes operados con la máquina corazón-pulmón pueden empeorar con el tiempo y sufrir el trastorno durante años. Aunque podrían intervenir muchos factores, la sospecha recae sobre los detritus microscópicos procedentes de células dañadas y las burbujas generadas por la máquina.

CORAZON Y PULMONES MECANICOS

MEDIANTE UNA BOMBA DE RODILLOS, la máquina corazón-pulmón hace circular sangre oxigenada en las intervenciones realizadas sobre el corazón o sus válvulas. La sangre procedente de las venas es recogida en un reservorio y de éste pasa a un oxigenador, donde capta oxígeno y libera dióxido de carbono; un filtro retira de la sangre detritus y burbujas. Al comienzo del proceso, un intercambiador de calor enfría la sangre para proteger a los tejidos de posibles lesiones. Los cirujanos pinzan y cierran el paso por la aorta; provocan una parada cardíaca con una solución fría de potasio. A partir de ese momento, la máquina sustituye a las funciones del corazón y de los pulmones durante toda la intervención. Terminada ésta, el intercambiador de calor vuelve a calentar la sangre, los cirujanos retiran la pinza aórtica y el corazón reinicia su función.



MAQUINA corazón-pulmón en acción

PARA EL BYPASS coronario se utilizan vasos extraídos de otra zona anatómica del propio paciente, con el fin de establecer un cortocircuito en una (*como en el esquema*) o más arterias bloqueadas y restaurar el flujo sanguíneo normal.

EL PINZAMIENTO de los vasos sanguíneos (*a* y *b*) o el paso de la sangre a través de una máquina corazón-pulmón puede liberar finas partículas (*c*) o burbujas que, a su vez, pueden ocluir vasos y privar de oxígeno a los tejidos correspondientes, provocando mínimos accidentes vasculares cerebrales que pueden ser responsables de los defectos cognitivos transitorios de los pacientes tras la operación.

PHOTO RESEARCHERS, INC./LECA (*fotografía*); ALICE Y. CHEN (*ilustración*); FUENTE: ST. JUDE MEDICAL, INC.

grasa, coágulos de sangre y burbujas, detritus sutiles. Es posible que los hematíes resulten dañados durante su recorrido por los circuitos de la máquina, con lo que perderían su capacidad de transportar suficiente oxígeno al cerebro y al resto del cuerpo. En el diseño original de Gibbon —que se sigue empleando, aunque con mejoras— la máquina bombea la sangre a través de tubos compresibles que se enrollan alrededor de rodillos acoplados a ejes que rotan. Cuando los ejes giran, como en una batidora, los rodillos exprimen su contenido y empujan la sangre a lo largo de los tubos. Incluso en las máquinas actuales, el contacto de la sangre con las paredes de los tubos puede lesionar las células sanguíneas, cuando no ser aplastadas por los rodillos.

En los modelos de Gibbon la sangre gotea sobre la malla de alambre en la que es expuesta al oxígeno. Pero este contacto directo condiciona, a menudo, que la sangre absorba demasiado oxígeno, con el consiguiente efecto tóxico. Son también frecuentes las burbujas de aire que circulan dentro de la máquina y provocan bloqueos en las arterias. Para minimizar ambos problemas, se ha desarrollado una variante más cercana a la estructura pulmonar: una membrana sintética y permeable a los gases.

A pesar de estas y otras mejoras —tales como el uso de tubos de polivinilo que evitan que las células sanguíneas se adhieran a sus paredes, de bombas centrífugas que tratan a las células sanguíneas con más delicadeza, de intercambiadores de gases que reducen el tamaño de las burbujas y de un control más firme de la temperatura— persiste un problema sin tratamiento apropiado. Todo el sistema, y el propio acto quirúrgico, pueden generar distintos tipos de detritus. Además de las burbujas, pequeños fragmentos de células sanguíneas, partículas desprendidas por la corrosión de los tubos y placas de la pared arterial —todos, en su conjunto, conocidos como émbolos— pueden pasar a través de la bomba y de las cánulas y llegar al cuerpo del paciente.

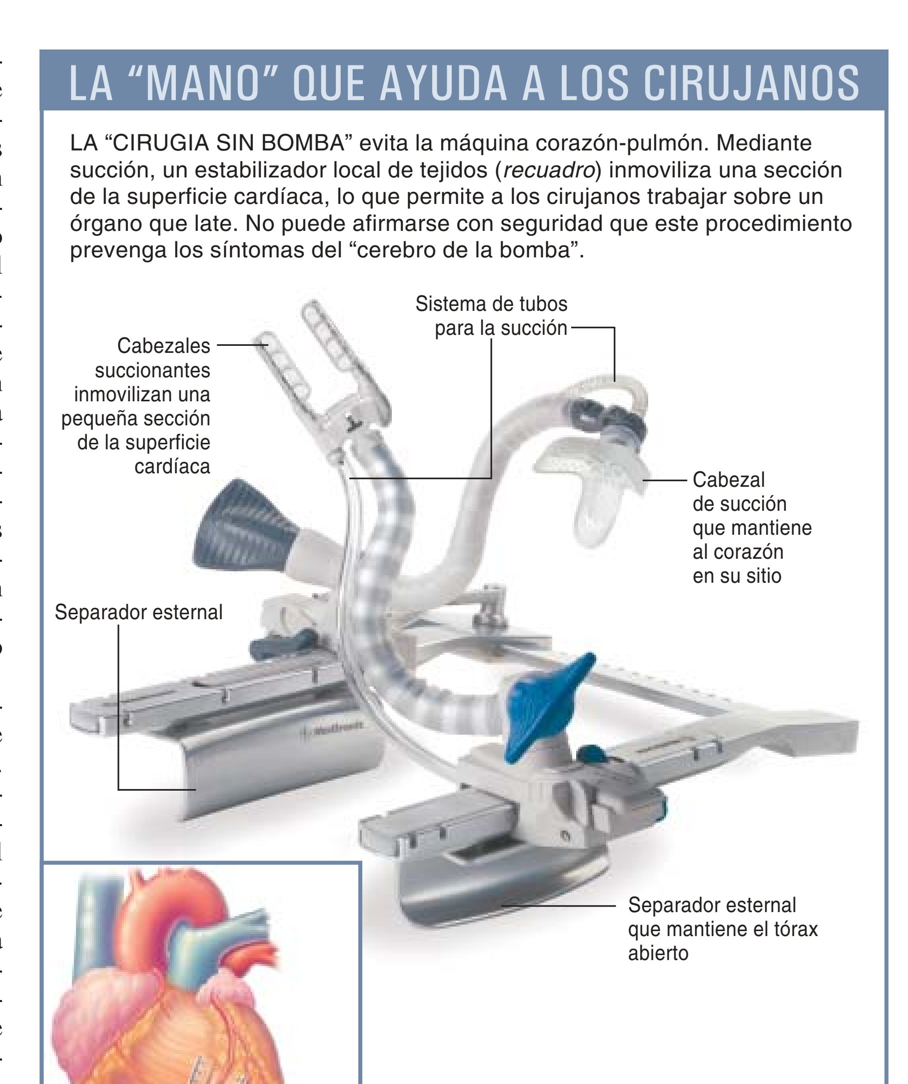
El funcionamiento de la bomba puede liberar detritus; parte de este material puede ser también liberado cuando el cirujano pinza la aorta para conectar los tubos. Si los émbolos resultantes quedan atrapados en los capilares, puede bloquearse el flujo sanguíneo, de manera similar a lo que sucede en un mínimo accidente vascular cerebral, provocando un déficit de irrigación o incluso la necrosis de una determinada área cerebral.

El avance de la técnica ha conseguido eliminar los émbolos de mayor tamaño. Con pantallas formadas por tejidos de hilos de polímeros colocadas en la bomba se filtran de la sangre las partículas de 0,2 a 0,5 micras. Las conexiones sin sutura reducen la manipulación de la aorta y cierran el paso de micropartículas a la corriente sanguínea. Detectores Doppler de ultrasonidos rastrean la presencia de microburbujas errantes. Si aparecen, el especialista que controla la máquina, conocido como perfusionista, ajusta el flujo de la sangre a través del intercambiador de gases. Pero los microémbolos —una décima parte del tamaño de los émbolos detectables y que alcanzan un número aproximado de 200 a 300 por hora— podrían escapar a esta detección y lesionar los tejidos, el cerebral en especial.

En opinión de Newman y otros, este tipo de anomalías que ocurren durante el acto quirúrgico podrían causar problemas cognitivos en los pacientes. Pero no faltan los escép-

LA "MANO" QUE AYUDA A LOS CIRUJANOS

LA "CIRUGIA SIN BOMBA" evita la máquina corazón-pulmón. Mediante succión, un estabilizador local de tejidos (*recuadro*) inmoviliza una sección de la superficie cardíaca, lo que permite a los cirujanos trabajar sobre un órgano que late. No puede afirmarse con seguridad que este procedimiento prevenga los síntomas del "cerebro de la bomba".



LOS ESTABILIZADORES atrapan la punta del corazón y un área de su superficie durante la operación.

MEDTRONIC (*instrumental*); ALICE Y. CHEN (*ilustración*)

El autor

BRUCE STUTZ ha ocupado, entre otros cargos profesionales, la dirección de la revista *Natural History*.

ticos. Una investigación, desarrollada a lo largo de un intervalo de cinco años, sobre 52 pacientes que habían sido sometidos a operaciones de bypass coronario no pudo demostrar la existencia de un declive postoperatorio global de las capacidades cognitivas de los individuos operados, cuando fueron comparadas con las capacidades demostradas preooperatoriamente. El trabajo, dirigido por Wolfgang Müllges, de la Universidad de Würzburg, se publicó en la revista *Neurology*, hace un año. Por todo ello, la creciente preocupación entre los cirujanos sobre la máquina corazón-pulmón ha propiciado la demanda de un mayor refinamiento de los medios técnicos y su rendimiento, así como la búsqueda de otras alternativas.

Cirugía cardíaca sin máquina corazón-pulmón

Una operación de bypass en las arterias coronarias realizada en un "corazón que late" ("beating heart") o "fuera de bomba" ("off-pump") podría compararse, en expresión de un cirujano, con "algo así como tallar una piedra preciosa montado a caballo"; sin embargo, los nuevos instrumentos permiten mantener quieto el caballo mientras el jinete trabaja. Los estabilizadores son como de patas de araña con los artejos acolchados que se agarran al corazón mediante succión en vacío. Aunque la cirugía cardíaca "fuera de bomba" quizá no sea la apropiada para todas las situaciones, sí puede convertirse en una alternativa para los pacientes que no toleran el estrés de la máquina corazón-pulmón. La cirugía "fuera de bomba" ("off-pump surgery") se realiza actualmente entre el 20 % y el 80 % de la cirugía cardíaca, dependiendo del cirujano y del hospital. [Para más información sobre esta alternativa véase "Cirugía cardíaca avanzada", por Cornelius Borst; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, diciembre de 2000].

La cirugía cardíaca "fuera de bomba" parece reducir el número de los émbolos mayores. En un estudio del año 2001 sobre 40 pacientes, realizado por B. Jason Bowles y colaboradores en el Hospital San Francisco de Honolulú, detectaron, mediante la instrumentación Doppler de ultrasonidos, una media de 21 émbolos en la cirugía cardíaca "fuera de bomba", frente a una media de 1766 émbolos en cirugía cardíaca con bomba corazón-pulmón. No están claros, sin embargo, los beneficios que esta alternativa pudiera reportar sobre la capacidad cognitiva. Otros estudios han obtenido resultados que distan de ser inconcusos, cuando no se muestran contradictorios.

Todos los intentos realizados con anterioridad para decidir qué tipo de intervención es mejor adolecen de varios inconvenientes: limitado número de integrantes de la muestra, diseños y objetivos diferentes y aplicación de criterios dispares en la valoración de la capacidad cognitiva. Por ello, las conclusiones resultan muy controvertidas. En el año 2007 el departamento de veteranos de los EE.UU. concluirá un extenso estudio financiado con 10 millones de dólares en el que se compara la cirugía cardíaca con bomba corazón-pulmón con la cirugía sin bomba. Dirigido por Frederick L. Grover, jefe del departamento de cirugía del Centro de Ciencias de la Salud de la Universidad de Colorado en Denver, se trata de un proyecto de seguimiento de los efectos sobre la capacidad cognitiva en 2200 pacientes operados del corazón en 17 hospitales de veteranos.

Si se tiene en cuenta que la cirugía cardíaca sin bomba corazón-pulmón es más barata, y más corta la estancia hospitalaria de los pacientes, ¿ha llegado el momento de retirar la máquina corazón-pulmón? Nadie está dispuesto a afirmarlo. Otros muchos factores, que intervienen durante e inmediatamente después de la cirugía cardíaca, pueden también participar en el declive cognitivo: inflamación, hipoxia (llegada de insuficiente oxígeno a los tejidos corporales), hipotensión arterial, arritmia cardíaca o temperatura corporal demasiado elevada o demasiada baja.

Hilary P. Grocott ha descubierto que los pacientes que tienen fiebre dentro de las primeras 24 horas tras una intervención de bypass coronario ofrecen mayor probabilidad de sufrir un declive cognitivo al cabo de seis semanas; pero no puede establecerse con certeza que en la fiebre resida la causa del declive cognitivo y que no se trate simplemente de un síntoma de dicha disfunción.

La cuestión fundamental, dice Newman, es la siguiente: "Entre todos los factores y procesos que concurren en la intervención, ¿cuáles son significativas respecto a los efectos perioperatorios? Si una serie de adaptaciones y mejoras pueden modificar los resultados precoces, podríamos seguramente invertir la tendencia al declive cognitivo". La medicina debe seguir buscando mejores respuestas a estas cuestiones.

Mientras tanto, yo he encontrado modos de luchar con esta dificultad. Me he programado períodos más cortos de trabajo. Paseo con frecuencia y me bajo del metro en una estación bastante alejada de mi casa para caminar más. Toco el piano, que fomenta la concentración. Transcurrido más de un año y medio de mi reparación valvular, me parece que voy recobrando la vida y la inteligencia de antes de la operación.

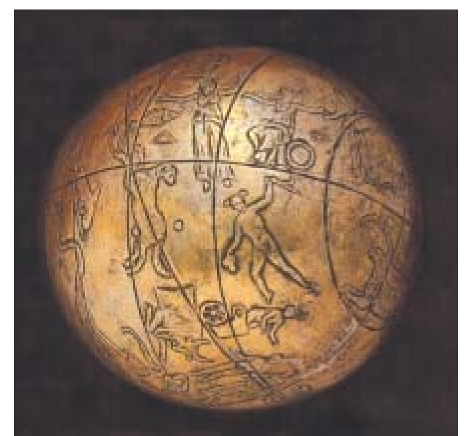
Bibliografía complementaria

LONGITUDINAL ASSESSMENT OF NEUROCOGNITIVE FUNCTION AFTER CORONARY-ARTERY BYPASS SURGERY. Mark F. Newman et al., en *New England Journal of Medicine*, volumen 344, n.º 6, págs. 395-402; 8 de febrero, 2001.

COGNITIVE OUTCOME AFTER OFF-PUMP AND ON-PUMP CORONARY ARTERY BYPASS GRAFT SURGERY: A RANDOMIZED TRIAL. Diederik Van Dijk, Erik W. L. Jansen, Ron Hijman et al., en *Journal of the American Medical Association*, vol. 287, n.º 11, págs. 1405-1412; 20 de marzo, 2002.

PROTECTING THE BRAIN IN CORONARY ARTERY BYPASS GRAFT SURGERY. Daniel B. Mark y Mark F. Newman, en *Journal of the American Medical Association*, vol. 287, n.º 11, págs. 1448-1450; 20 de marzo, 2002.

Las esferas del mundo



Las representaciones del mundo fueron reflejando progresivamente el modelo copernicano, sin dejar de manifestar la influencia de la Antigüedad

Denis Savoie

Una exposición celebrada en París sobre "El arte de las mecánicas celestes" reunió unos cincuenta globos, esferas celestes y anillos astronómicos antiguos. A continuación describiremos algunos de estos objetos, que muestran los conocimientos astronómicos de antaño y dan una idea de la diversidad de instrumentos astronómicos que se utilizaron para comprender o describir el cielo.

La esfera armilar

La esfera armilar es un instrumento conocido por los astrónomos desde la Antigüedad. Entonces existía una ciencia de la mecánica aplicada al mundo celeste, la esferopea, sobre la que Arquímedes habría compuesto un tratado. Por lo que se sabe, la esferopea versaba sobre la construcción de esferas armilares que sirvieran para mostrar los movimientos celestes. En el siglo II, el astrónomo griego Ptolomeo describió este tipo de esfera (que llamó "astrolabio") en una de sus obras, concretamente en el Libro V del *Almagesto*. Ahí arremetía contra los que practicaban la esferopea y precisó que "quienes construyen esferas yerran con respecto a las hipótesis, pues no representan sino la



CORTESIA DE ALEXIS KUGEL

1. GIROLAMO DELLA VOLPAIA, uno de los mejores constructores italianos de instrumentos del siglo XVI, fabricó esta esfera armilar en Florencia en 1571. Además de la eclíptica, sobre la que están grabadas las constelaciones zodiacales, la esfera contiene dos anillos móviles con los símbolos del Sol y la Luna. En este montaje de inspiración ptolemaica, los dos astros giran alrededor de la Tierra, que se sitúa en el centro.

2. EN ESTA ESFERA CELESTE de cristal de roca, construida hacia 1600, no sólo se representan las constelaciones, sino también determinadas estrellas, cada una de un tamaño proporcional a su brillo.



CORTESIA DE ALEXIS KUGEL

apariencia en vez del fundamento, de suerte que ofrecen una prueba de su arte pero no de las hipótesis".

En la época de Ptolomeo, la esfera armilar no sólo se utilizaba habitualmente como instrumento pedagógico, para la enseñanza de la astronomía esférica, sino que se había convertido sobre todo en un instrumento de observación del Sol, la Luna, los planetas y las estrellas; permitía medir directamente las coordenadas celestes, aunque con una precisión poco satisfactoria, o incluso mala si sus dimensiones eran reducidas. Sin embargo, tenía tanto valor pedagógico, que en el siglo XVIII un astrónomo tan destacado como Lalande seguía recomendando su utilización.

Por regla general, una esfera armilar consta de un círculo máximo fijo y graduado, el meridiano, y de un segundo círculo máximo, perpendicular al primero, que representa el horizonte del lugar. En ella también se encuentra el ecuador celeste, cortado oblicuamente por la eclíptica, que representa la trayectoria aparente del Sol sobre el cielo a lo largo del año (*véase la figura 1*). Por lo normal, sobre la eclíptica aparecen los 12 signos del zodiaco; cada uno cubre 30 grados. La eclíptica es tangente a dos círculos menores situados a ambos lados del ecuador, los trópicos de Cáncer y de Capricornio. En ocasiones, el constructor añadía los círculos polares ártico y antártico. En algunos modelos los círculos son móviles y, por consiguiente, permiten resolver algunos problemas de trigonometría esférica.

La esfera armilar constituye una representación artística de los círculos de la esfera celeste. Los diversos círculos móviles y fijos, encajados unos en otros, de que se compone tienen por centro la Tierra. Se trata, por tanto, de una representación geocéntrica del universo, que durante el Renacimiento se convirtió en un objeto de lujo con el que los poderosos y los amantes del saber decoraban sus gabinetes. A lo largo del siglo XVI florecieron talleres de fabricantes de instrumentos que hacían gala de una habilidad sorprendente; se sustituyó la madera por el metal (no ha llegado hasta nuestros días ninguna esfera armilar de la Antigüedad), y las técnicas de grabado alcanzaron una precisión tal que, por ejemplo, el astrónomo danés Tycho Brahe llamó a su observatorio de Uraniborg a un relojero-mecánico de gran renombre (Jost Byrgi) para que le construyese los instrumentos que precisaba.

Con Tycho Brahe la esfera armilar alcanzó dimensiones considerables. Se hizo construir una esfera de cobre macizo y madera recubierta de metal que medía 2,72 metros de diámetro, con un sistema de observación provisto de alidadas (visores para apuntar con precisión hacia los astros). Se trata, sin embargo, de una excepción; en el siglo XVII, la esfera armilar en cuanto instrumento de observación quedó relegada a una mera curiosidad. En la actualidad reaparece tímidamente en la enseñanza para explicar el movimiento aparente del Sol. No hay que olvidar que este venerable instrumento es el antecesor directo de los planetarios modernos.

De la esfera armilar a la esfera celeste

Las esferas armilares son globos celestes descortezados. La bóveda celeste ya se representaba mediante una esfera en la Antigüedad griega, en el siglo IV antes de nuestra era (*véase la figura 1*). El globo celeste más conocido es, sin duda, el *Atlas Farnesio*, que se conserva en el museo de Nápoles. Es una copia romana realizada a comienzos de nuestra era a partir de un original griego, un testimonio singular de la alianza entre la ciencia y el arte.

La mayoría de los globos celestes representan de forma alegórica las constelaciones, con sus estrellas principales, así como algunos círculos de la esfera celeste, como los meridianos, el ecuador y la eclíptica. También aquí hay que remontarse a Ptolomeo, quien no sólo abordó en su *Almagesto* la teoría de la construcción de globos celestes, sino que proporcionó una lista de las 48 constelaciones que se encuentran en el cielo, especificando las coordenadas eclípticas y la magnitud de 1022 estrellas. Esta partición del cielo se mantendría intacta durante centurias, hasta el siglo XVI. En el Renacimiento, los globos tuvieron sobre todo una función decorativa, y uno de los ejemplares más bellos es un pequeño globo de cristal de roca grabado de principios del siglo XVII.

Sin embargo, las esferas no se limitaban a representar el cielo. A veces representaban la Tierra, con sus continentes y sus ciudades, lo cual permite hacerse una idea de los conocimientos geográficos del siglo XVI; las desproporciones de ciertos continentes, deformados dada la incapacidad de medir correctamente las longitudes, son enormes.

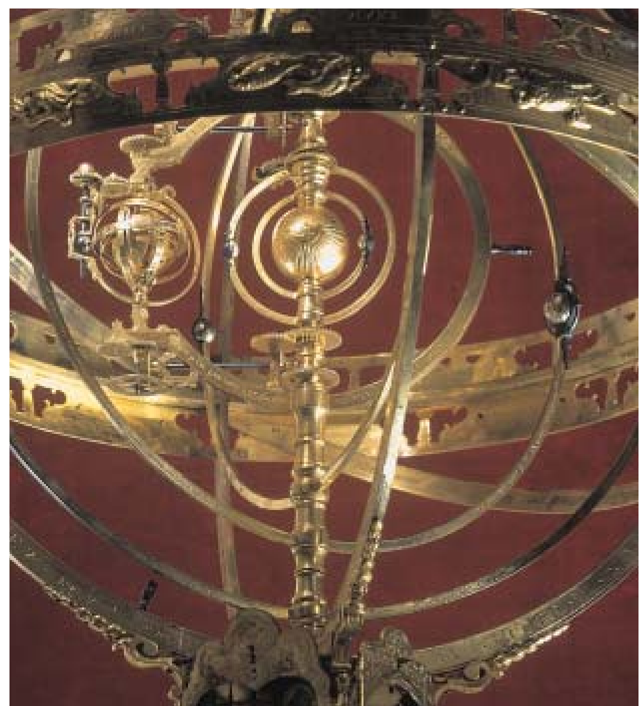
El anillo astronómico: una esfera esquematizada

En el Renacimiento las esferas celestes empezaron a tener otros usos. Se redujeron los tamaños y se conservaron sólo algunos de los círculos astronómicos, hasta convertirlas en cuadrantes solares portátiles. La esfera armilar se transformó en un anillo astronómico, el llamado cuadrante solar "de altura", ya que su finalidad consistía en determinar la hora solar del lugar a partir de la altura del Sol sobre el horizonte.



En la Antigüedad, época en que se construyeron cuadrantes solares portátiles, ya se sabía que, a una latitud dada, la altura del Sol depende de la fecha y la hora. A partir de esta constatación tan simple, los constructores de cuadrantes solares generaron una cantidad increíble de cuadrantes de altura portátiles, algunos muy conocidos, como el reloj de pastor, el *Navicula*, el *Volpaia*, el *Capucin* y hasta el anillo solar que puede adquirirse en algunas tiendas como objeto de decoración.

El anillo astronómico es la culminación de este tipo de cuadrante solar, pues es universal, es decir, utilizable en cualquier latitud, y se orienta solo. En general, se compone de tres círculos insertos unos en otros. En primer lugar, está el círculo meridiano, sobre el que se ha grabado la escala de latitudes. En el interior del círculo meridiano, y perpendicular a éste, se encuentra el círculo ecuatorial, graduado en horas, ya que en él debe leerse la hora solar. Por último, en el centro se sitúa el mecanismo de ajuste: en función de la fecha (es decir, según la declinación del Sol), se ajusta el sistema de mira, que puede consistir en un orificio corredero, o bien, como en el caso del anillo ecuatorial de Jacques Canivet, de 1772 (*véase la figura 4*), un sistema de pínulas, utilizado también para la alineación. El instrumento resulta fácil de utilizar: después



3. LAS ESFERAS MOVILES aparecieron en el Renacimiento y son el fruto de la alianza entre la astronomía y la relojería. En la esfera móvil construida por Pierre de Fobis entre 1540 y 1550 (*izquierda*) puede distinguirse el mecanismo de relojería que ponía en movimiento la esfera celeste. Algunas veces resultan movimientos muy complejos, como ilustra este detalle de la esfera móvil de Jean Pigeon, de 1723 (*arriba*): el artista fabricó un verdadero sistema solar en miniatura en el que Mercurio, Venus, la Tierra (con la Luna), Marte, Júpiter y Saturno giran alrededor del Sol.

CORTESIA DE ALEXIS KUGEL

El autor

DENIS SAVOIE es especialista en historia de la astronomía y director del departamento de astronomía del *Palais de la Découverte*.

de ajustarlo a la latitud del lugar gracias a la argolla de suspensión y tras adecuar el sistema central a la fecha del día, se sostiene el conjunto con el dedo y se le hace girar, de forma que la luz solar que atraviesa el orificio se proyecte sobre el plano ecuatorial. Ese es el instante en que queda orientado el cuadrante (el círculo meridiano se alinea con el meridiano del lugar) y la hora solar local se lee sobre el círculo ecuatorial.

Está claro que el anillo astronómico presenta algunos inconvenientes: además de conocer la latitud del lugar de observación (lo que requería disponer de tablas de coordenadas geográficas) al proceder al ajuste, era necesario saber si había pasado ya o no el mediodía, algo mucho menos evidente de lo que parece. Además, como la altura del Sol varía poco en la culminación (el paso del Sol por el meridiano), no se podía conocer con precisión la hora.

Este tipo de cuadrante alcanzó su plenitud en el siglo XVIII, debido especialmente a un tratado sobre cuadrantes solares escrito por el benedictino Bedos de Celles titulado *La Gnomonique pratique*, cuya edición de 1760 tuvo una gran aceptación.



4. EL ANILLO ASTRONOMICO es una esfera armilar esquematizada: sólo se conservan el anillo externo, que representa el meridiano y lleva inscrita una escala de latitudes, y el anillo interno, el ecuador, sobre el que se ha grabado una escala horaria. Este anillo universal fue construido por Jacques Canivet en 1772 y permite leer la hora esté donde esté el observador.

CORTESIA DE ALEXIS KUGEL

Eppur si muove

Ya en la Antigüedad, cuando se construyeron las primeras esferas celestes, se pensó en dotarlas de movimiento, pero no fue de verdad posible hasta que en el siglo XIII se inventó la relojería, que el historiador Emmanuel Poulle ha definido como "la producción autónoma y permanente de una información astronómica obtenida combinando un motor, un regulador y un engranaje intermedio". La relojería astronómica planetaria nació, pues, en la Edad Media, y su exponente más conocido fue el astrario de Giovanni Dondi, finalizado en 1380 y considerado por entonces como una de las maravillas del mundo.

Así como los relojes astronómicos medievales son relojes monumentales, los fabricados en el Renacimiento suelen ser de mesa. Esta miniaturización es el resultado de la utilización del resorte como motor del peso. Sin embargo, no todos los relojes planetarios eran accionados por un mecanismo concreto; algunos se movían de forma manual. Con el tiempo, los relojeros construirían "esferas móviles", es decir, unas esferas celestes accionadas mediante un mecanismo de relojería. Del siglo XVI al siglo XVIII se fabricaron verdaderas joyas, que sólo los mecenas más ricos de Europa podían permitirse.

Las primeras esferas móviles no eran sino globos o esferas armilares que indicaban, por ejemplo, qué constelaciones resultaban visibles por encima del horizonte en un instante dado. Enseguida se intentó plasmar en ellas otras informaciones astronómicas; las esferas se transformaron en verdaderos planetarios, en los que la Luna giraba alrededor de la Tierra. Los relojeros contribuyeron a su manera a la difusión del sistema heliocéntrico de Copérnico, con la construcción de esferas móviles donde los planetas giraban alrededor del Sol.

Algunas de estas esferas tenían finalidad astrológica, como la esfera móvil de Pierre de Fobis, relojero afincado en Lyon, construida entre 1540 y 1550. Daba las constelaciones visibles a una hora determinada por encima del horizonte (lo que permitía determinar el ascendente), la posición del Sol en los signos del zodiaco y la de las casas astrológicas (*véase la figura 3*).

Los relojes planetarios no eran privativos de los emperadores. Ya en el siglo XV, algunos monasterios disponían de relojes planetarios; debían allí recordar, sin duda, la coherencia matemática del universo.

Bibliografía complementaria

EL ASTRARIO DE GIOVANNI DONDI. Emmanuel Poulle, en *Investigación y Ciencia*, págs. 49-53, septiembre de 2001.

GNOMONIQUE MODERNE. Denis Savoie. Éditions Les Belles Lettres; París, 2001.

SPHÈRES, L'ART DES MÉCANISMES CÉLESTES, CATALOGUE DE L'EXPOSITION. J. Kugel; París, 2002.

Identidad cuántica

Desde hace tiempo se intenta rasgar el velo de misterio que envuelve a la mecánica cuántica. Debe esa rara apariencia que la caracteriza a un fenómeno singular: las diversas partículas de un mismo tipo resultan indistinguibles entre sí

Peter Pesic

La mecánica cuántica constituye el quicio sobre el que descansa la física moderna, el hilo conductor por el laberinto de átomos y núcleos, la clave de la estabilidad de la materia. Permanece, sin embargo, rodeada de misterio. Sus hipótesis básicas no han dejado de parecernos desconcertantes. En ella, todo es, a la vez, onda y partícula. Incertidumbre y probabilidad la rigen. Cien años después, expertos y profanos siguen perplejos. Albert Einstein, para quien la teoría cuántica caía en lo "fantasmal", trató de obviarla. Paul Dirac pensaba que "ni siquiera con palabras podemos explicarla bien"; por eso había que apoyarse en su estructura matemática abstracta. Pero tras haber dominado el lenguaje formal de la mecánica cuántica, agregaba Freeman Dyson, no cabe más remedio que "reconocer que no hay nada que entender". Richard Feynman, un maestro en encontrar maneras sencillas de explicar ideas complejas, confesaba tras resumir las reglas básicas de la teoría: "Me gustaría preguntar: ¿Cómo funciona? ¿Qué maquinaria subyace bajo la ley? Nadie la ha visto. Nadie explicar más que lo que hemos explicado. Nadie nos ofrecerá una representación más profunda. No contamos con idea alguna acerca de un mecanismo más fundamental del que se deduzcan estos resultados."

Estamos, pues, atrapados en las dificultades de la teoría cuántica. Lo que no ha impedido que superase con brillantez todas las pruebas experimentales. Sin embargo, tal vez exista alguna manera de abordarla que proyecte su misterio en una perspectiva más clara. Desde hace veinte años vengo ocupándome del papel de la identidad y la individualidad en la historia y los fundamentos de la mecánica cuántica. En mi opinión, su núcleo reside en una concepción radical, que defendía que las partículas elementales carecen de individualidad. Sus identidades se entremezclan y, con ello, engendran el extraño mundo de los fenómenos cuánticos.

Desde hace mucho, la identidad cuántica ha sido una propiedad admitida de la teoría, decisiva para entender el enlace químico y la estructura de los elementos. Con todo, venía a ser un escolio de otras hipótesis, más abstractas. Quiero darle la vuelta a la cuestión. Pondré la identidad cuántica en el centro del misterio. En círculos restringidos he ofrecido argumentos matemáticos para justificarlo; aquí presentaré algunas reflexiones generales, que apoyan mi tesis: para desentrañar el misterio de la mecánica cuántica, se requiere considerarlo una consecuencia de la identidad cuántica.

Cortados por un mismo patrón

En la búsqueda de una nueva intelección de la teoría cuántica, conviene empezar por el problema de la individualidad. De larga tradición en filosofía y en física, aparece ya en las primeras especulaciones griegas en torno a los átomos. Para Aristóteles, la individualidad constituía una propiedad fundamental de las personas, los objetos o los átomos. No obstante, atribuía una importancia mayor a la pertenencia común a una especie o género.

Los filósofos posteriores volvieron a plantearse la naturaleza de la individualidad. En el siglo XVII, Gottfried Wilhelm Leibniz exponía que dos hojas no podían nunca ser exactamente la misma, aun cuando procedieran del mismo árbol. Desde su óptica, la unicidad de cada hoja reflejaba su peculiar historia y posición en el universo, no la individualidad intrínseca de una hoja. Un Dios racional, aducía Leibniz, no permitiría individuos idénticos; pues, ¿cómo podría Él situar una *aquí* y otra *allí* si no pudiese identificarlas?

Leibniz estaba convencido de que la unicidad individual contradecía la existencia de átomos anónimos.

El autor

PETER PESIC, profesor del Colegio Universitario St. John's de Santa Fe, se doctoró en física en la Universidad de Stanford. Las ideas que hilvana en este artículo hallan un amplio desarrollo en su último libro, *Seeing Double: Shared Identities in Physics, Philosophy, and Literature*.

1. ESTE SANTUARIO SINTOISTA, de dos mil años de antigüedad, cercano a Ise, en Japón, se conserva como el primer día porque los edificios de madera de ciprés se reconstruyen por completo cada 20 años. El santuario de Ise evoca una cuestión filosófica debatida desde la época de Platón: cuando un objeto experimenta de manera constante grandes renovaciones, ¿hasta qué punto pierde su identidad original? Estas inquietudes filosóficas acerca de la identidad empezaron a adquirir una dimensión científica, práctica, en el siglo XIX, cuando se sentaron los fundamentos de la futura teoría cuántica. Como explica el autor, el papel de la identidad y de la "identicidad" de las partículas subatómicas ilumina los extraños efectos de la mecánica cuántica.

Por la misma época, Isaac Newton abogaba por la realidad de los átomos, que consideraba distinguibles. Para Newton, la diferencia entre las individualidades de dos partículas es tan patente, que resulta imposible confundirlas. Sin embargo, la aplicación de la mecánica newtoniana a la materia sacaba a la luz un aspecto de la realidad radicalmente nuevo: las fuerzas ejercidas entre objetos. El propio Newton razonaba que la gravedad actuaba a distancia, a grandes distancias; no directamente, sino a través de "la mediación de algo *que no es material*". Unos dos siglos más tarde, con un talante similar, Michael Faraday describía la electricidad y el magnetismo mediante líneas de fuerza o campos, expresiones que acuñó. En la mente de Faraday, la materia había perdido su carácter central. La realidad genuina se hallaba en las líneas de fuerza.

Faraday generalizó su concepción a los campos invisibles que constituyen la luz visible, entendida como ondas ligadas a las líneas de fuerza. Le impresionaba profundamente que esas vibraciones no estuviesen fijas en el espacio: los campos estacionarios rodeaban las cargas estáticas o los imanes, pero cuando estas fuentes se aceleraban, sus campos adquirían libertad y se manifestaban como ondas de luz que se propagaban por un espacio sin límites. No mucho antes, el famoso experimento de difracción de Thomas Young había mostrado que la luz consistía en ondas. En el aparato de Young, la luz generaba patrones de interferencia porque, siendo procesos y no objetos materiales las ondas, resultaban intercambiables y podían coincidir en el espacio y el tiempo.

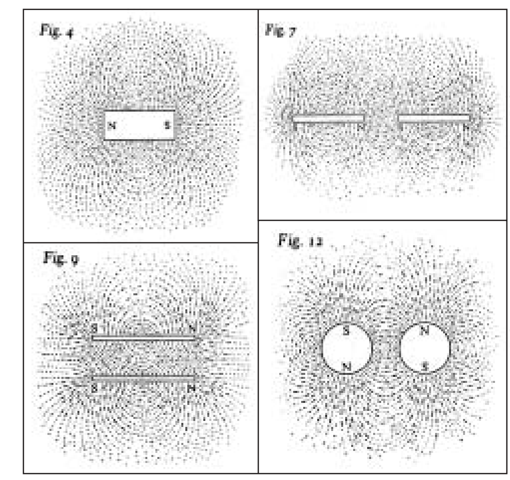
Quedó claro para Faraday que, estacionarios o en movimiento, los átomos daban lugar a campos indistinguibles entre sí. Tal idea socavaba la individualidad de los propios átomos, ya que la visión radical de Faraday entrañaba otra consecuencia, que no se extrajo entonces. A saber, si la carga y la materia sólo existen en cuanto recurso literario para referirse a la densidad de unas líneas de campo, en sí indistinguibles, las partículas materiales tampoco serán realmente distinguibles. La visión de Faraday de un mundo de campos cuestionaba la clase de individualidad que correspondía a las partículas impenetrables.

Con el trabajo de Faraday comenzó el diálogo entre campos y partículas que nos es tan familiar. Pero varios decenios antes, en paralelo con la configuración de la teoría atómica, se produjo otro avance crucial: los átomos perdieron su individualidad. John Dalton sostuvo en 1800 que los átomos de hidrógeno debían mostrarse iguales en sus propiedades observadas. De lo contrario, el hidrógeno no sería un elemento exclusivo, sino una multitud de distintos "hidrógenos".

James Clerk Maxwell, más joven que Faraday, propuso también la identidad absoluta de todas las molé-







2. MICHAEL FARADAY es conocido por sus logros experimentales, muchos de los cuales tuvieron lugar en su laboratorio de la Royal Institution (*izquierda*). Con limaduras de hierro puso de manifiesto las líneas de fuerza que manaban de distintos imanes (*derecha*); resaltaba así la importancia de los campos y recortaba la de las partículas materiales que los originan. La comprensión de que los campos se interpenetran y pierden todo sentido de individualidad facilitó que se percibiese que lo mismo ocurría con las partículas.

AIP EMILIO SEGRE VISUAL ARCHIVES (*izquierda*); Líneas de campo reproducidas de la obra de Faraday *Experimental Researches in Electricity* (*derecha*)

culas, "se encuentren en la Tierra, en el Sol o en las estrellas fijas". Se apoyaba, para ello, en los patrones espectrales; aparecían los mismos en la Tierra y en la luz de estrellas remotas. A su vez, los espectros estelares revelaban que los átomos conservaban las mismas propiedades desde hacía muchísimo tiempo, desde el momento en que emitieron la luz captada aquí. Maxwell concluyó que cada molécula estaba cortada por un mismo patrón, con una uniformidad que les confería "carácter de artículo manufacturado".

Los experimentos posteriores mostraron más pruebas del corte por el mismo patrón. Empezaron con el descubrimiento de los "rayos catódicos", descargas eléctricas luminosas en tubos de cristal en los que se había hecho el vacío (predecesores de los monitores de televisión y de vídeo). En 1897, J. J. Thomson logró, por medio de campos eléctricos y magnéticos cruzados, curvar las trayectorias de los rayos catódicos. Encontró que la razón de su carga a su masa tenía un solo valor, universal; lo que no entrañaba dificultad de comprensión alguna si consistían en corrientes de partículas de la misma carga y masa. (Ahora las llamamos electrones.) Dos años más tarde descubrió valores idénticos para las partículas producidas cuando la luz incide sobre una placa metálica (el efecto fotoeléctrico). Thomson denominó "corpúsculos" a ambos tipos de partículas; subrayaba así su carácter particulado.

Desesperación de Planck

Los experimentos de Thomson con electrones corroboraban la existencia de unidades indivisibles de la materia, pero no abordaban de manera directa su individualidad. Esta cuestión afloraría, por aquellas fechas, en otra área de la física, la termodinámica. En principio, la mecánica newtoniana sigue la trayectoria de cada partícula por separado. Para vérselas con la cifra ingente de átomos que componen los objetos ordinarios, Ludwig Boltzmann y otros físicos del siglo XIX desarrollaron la mecánica estadística. Con todo, Boltzmann pensaba que, entre los principios de la física, el fundamental era la continuidad y la distinguibilidad de la trayectoria de cada partícula. Sin embargo, la esencial igualdad de los átomos entraba en conflicto con el determinismo individual de la mecánica newtoniana.

La crisis estalló en el año 1900. Fue a raíz del trabajo de Max Planck, aunque éste alteró la noción de individualidad más de lo que contribuiría a articular su importancia. Se proponía conciliar los principios reversibles de la física newtoniana con las leyes irreversibles de la termodinámica. Para ello, imaginó un horno con una pequeña abertura por donde escapase la luz. Se había demostrado ya que, si el horno era perfectamente negro, absorbería y emitiría todas las frecuencias de luz, con independencia del material de que estuviera hecho. El color de la luz emitida —la *radiación del cuerpo negro*— dependía sólo de la temperatura del horno. Planck quería conocer los mecanismos físicos fundamentales que determinaban el espectro de esta luz.

Sus colegas berlineses midieron con mayor precisión, también en esos mismos días, el espectro de la radiación del cuerpo negro (incluidas las componentes infrarroja y ultravioleta, cuya medición no se había acometido hasta entonces). Con esa gavilla de observaciones esperaba Planck someter a prueba su teoría. Andando el tiempo, Planck llamaría a lo que sucedió "un acto de desesperación". Para que la tesis concordase con los datos experimentales, había que admitir que, en el horno, sólo se intercambiaban cuantías discretas de energía; a esos paquetes les puso el nombre de *quanta,* o cuantos.

Se quedó intranquilo; la hipótesis, carecía, a su parecer, de sentido. Para esclarecer el asunto, ideó una nueva expresión de sus resultados que resaltaba la importancia central del átomo. Aunque la teoría atómica había ganado una amplia aceptación a finales del siglo XIX, Wilhelm Ostwald y Ernst Mach, científicos

eminentes, seguían viendo en los átomos meros constructos teóricos, sin realidad física.

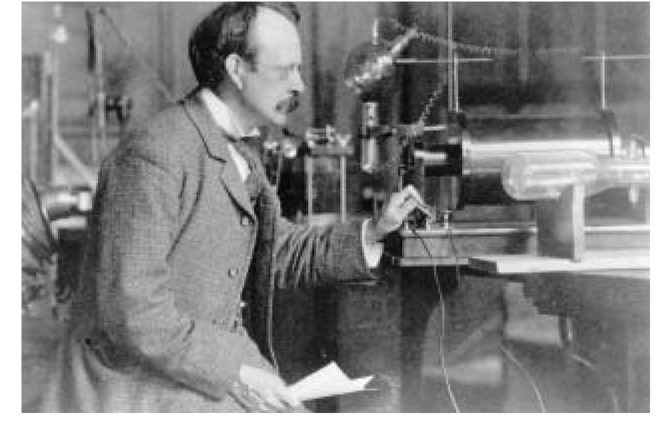
El propio Planck compartía en un comienzo ese mismo escepticismo. Pero acabó siendo atomista a raíz de sus reflexiones sobre la probabilidad. No podía haber estadística, razonó, sin objetos discretos que contar; es lo que sucede con las probabilidades de las apuestas: se apoyan en los estados discretos proporcionados por las caras de los dados tirados. La comprensión de la física, prosiguió, descansa sobre la probabilidad relativa de los estados, que, por tanto, deben ser discretos o atómicos.

Planck generalizó el enfoque para incluir la luz misma, amén de gases o conjuntos de átomos. Estaba seguro de que la luz, aunque inmaterial, obedecía las leyes de la termodinámica. Parecían leyes tan universales, que no podían admitir excepción alguna. Por consiguiente, debía haber alguna entidad básica que permitiera contar las distintas probabilidades de los estados de la luz; deberían existir "átomos" de luz, y un átomo de luz no podía ser sino un estado discreto de energía luminosa, o cuanto. Pero el razonamiento llevaba a un punto crítico: al contar las distintas maneras en que los cuantos de luz podrían repartirse la energía, Planck los tenía que tratar como absolutamente indistinguibles entre sí; en caso, contrario los resultados teóricos discrepaban de los experimentales.

Planck no apostilló el curioso método de cómputo empleado, quizá más preocupado por la necesidad de discretizar, por esa decisión "desesperada" de atribuir al salto cuántico, h, un número finito distinto de cero. Todavía en 1909, seguía presentando su extraña forma de cómputo sin parecer percatarse de tal rareza, como si se tratara de una peculiaridad de su enfoque teórico, y no una particularidad de la propia luz. La integridad de Planck impidió que negase lo que había afirmado ni siquiera mientras batallaba por superar su paradoja.

La singular manera en que Planck contaba los cuantos de luz sólo fue el inicio. La pérdida radical de la individualidad terminó por convertirse en una característica esencial de la estructura de la teoría cuántica. En 1952, reflexionando acerca de las partículas cuánticas, Erwin Schrödinger subrayaba que "no se debe ni *imaginar* siquiera que cualquiera de ellas esté *marcada* por un 'punto rojo', de suerte que más tarde podamos reconocerla como *la misma* partícula". En contra de lo admitido por Newton y Einstein, no se puede tomar *un* neutrón, marcarlo y seguir su curso subsiguiente. En esta asombrosa combinación de perfecta igualdad y completa indistinguibilidad reside el auténtico núcleo de la identidad cuántica. Ninguna lengua tiene una palabra adecuada para esta condición. Referirse a ella como "falta de individualidad" implica, erróneamente, que las partículas cuánticas deberían haber tenido individualidades pero carecen de ellas. He acuñado una palabra para expresar, de forma positiva, esa naturaleza peculiar suya: *identicidad*. Quiere decir que los miembros de una especie sólo tienen identidad en cuanto miembros de tal especie, sin ningún tipo de rasgos que distinga a un individuo de otro. La identicidad incluye la total indistinguibilidad y la completa igualdad de las propiedades observables, con independencia de cuándo o dónde se midan.

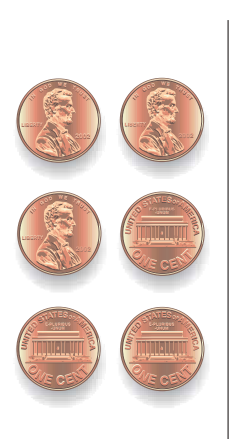
Tan extraña es esta condición, que algunos filósofos prefieren tratar las partículas cuánticas como si poseyeran todavía individualidad, aunque oculta a la vista. Desde un punto de vista lógico, tal encubrimiento es posible, pero parece innecesariamente complicado. Para mí, si la individualidad se oculta del todo, se pierde.



3. LOS EXPERIMENTOS DE J. J. THOMSON revelaron, a finales del siglo XIX, que los rayos catódicos eran corrientes de partículas dotadas de carga (electrones) que siempre muestran una misma razón entre la carga eléctrica y la masa. Este resultado daría más tarde a entender que las partículas subatómicas son completamente indistinguibles unas de otras.

Más allá de la individualidad

Mostraremos un ejemplo que ilustra la naturaleza de la identicidad, basado en unos experimentos de Johann Summhammer y Hermann Rauch, de la Universidad Técnica de Viena, Anton Zeilinger, del







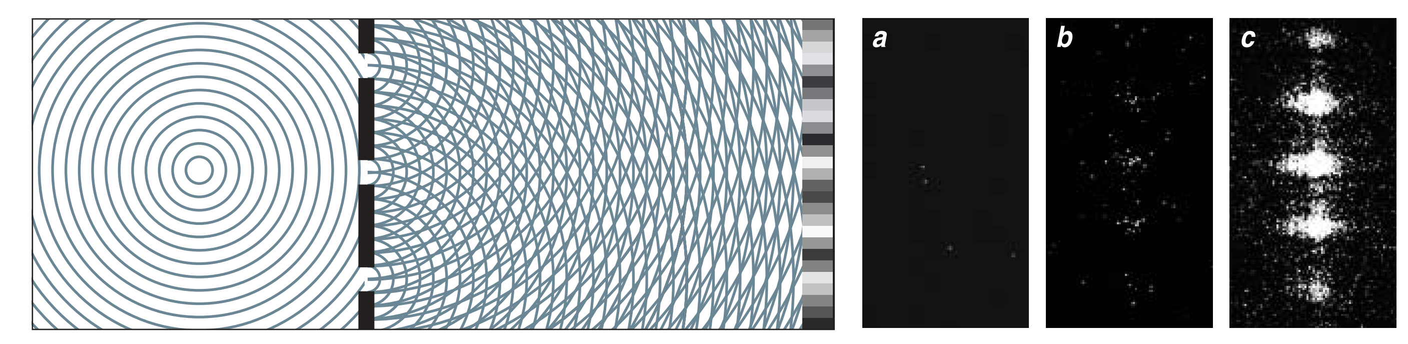






4. MAX PLANCK (*derecha*) enunció una teoría del espectro de la radiación del cuerpo negro mediante una aproximación antes aplicada a los grandes conjuntos de partículas de gas. Había que contar el número de estados distintos de la energía luminosa, o cuantos. Sólo dio con el resultado correcto cuando tomó a los cuantos de la luz por idénticos. Si hubieran sido distinguibles, la respuesta habría sido diferente, de la misma manera que el número de resultados posibles al lanzar dos monedas difiere según las monedas sean idénticas (*izquierda*) o distinguibles (*centro*).

LABORATORIO CAVENDISH, UNIVERSIDAD DE CAMBRIDGE (*arriba*); AIP EMILIO SEGRE VISUAL ARCHIVES (*abajo*)



5. LA INTERFERENCIA ENTRE ONDAS constituye un fenómeno sencillo y comprensible. En este ejemplo (*izquierda*), las ondas luminosas, que emanan de una única fuente y atraviesan las tres rendijas de la barrera intermedia, interfieren entre sí y producen una serie de bandas luminosas y oscuras cuando se proyectan sobre una pantalla. La luz está formada por fotones individuales que se interfieren —incluso cuando la intensidad de la luz es tan baja, que sólo pasa un fotón a la vez por el aparato—. La interferencia no se percibe si se la observa cuando sólo han llegado a la pantalla unos cuantos fotones (*a*). Ahora bien, si se espera hasta que haya impactado en ella un mayor número, unos 150, se irá descubriendo una estructura (*b*). Con un número aún mayor, unos 15.000, se ven con claridad los efectos de la interferencia: las tres rendijas crean cinco concentraciones de luz (*c*).

IMAGENES DE LA INTERFERENCIA FOTON A FOTON, CORTESIA DE ROBERT AUSTIN Y LYMAN PAGE, UNIVERSIDAD DE PRINCETON

Instituto de Tecnología de Massachusetts, y otros. Dentro de un recipiente en el que se ha hecho el vacío, se desdobla un chorro de neutrones (provenientes de un reactor nuclear). Ambas ramas se desvían hacia unos cristales de silicio, que las juntarán de nuevo. Separados varios centímetros los cristales, podemos distinguir muy bien las dos trayectorias (los haces de neutrones no son mayores que un sello de correos). Ahora bien, no nos será concedido poder, en virtud de la trayectoria que tomen, distinguir entre neutrones idénticos. El patrón característico que forman los neutrones cuando los haces se recombinan resulta de la interferencia ondulatoria entre los neutrones; dicha interferencia, a su vez, refleja la imposibilidad de determinar las individualidades de los neutrones, pese a que llegan enteros e indivisos al detector situado en el extremo opuesto. Esta singular mezcla de fenómenos suele denominarse “dualidad onda-partícula”.

No sigamos la vía de imaginar un neutrón como onda y partícula a la vez. Optemos por considerar ambos aspectos un reflejo de la identicidad de los neutrones. Para someter a prueba esta suposición modifiquemos un poco el experimento. Cada neutrón tiene una cierta propiedad intrínseca, el espín. Es posible utilizar una fuente que genere neutrones polarizados, es decir, tales que sus espines se hallen todos alineados; que apunten hacia arriba, por ejemplo. Una tal fuente producirá el mismo resultado que antes, debido a que los neutrones siguen siendo indistinguibles. Pero si se introduce un imán especial que invierta el espín en una de las rutas, los neutrones de las dos trayectorias se volverán distinguibles y la figura de interferencia desaparecerá. Los efectos característicos de la interferencia cuántica también se dan en sistemas mayores: átomos, micromoléculas y macromoléculas (fullerenos). En este tipo de experimentos, la fuente puede ser tan débil que en cualquier instante de tiempo sólo haya una partícula en el aparato. Por tanto, la cuestión no reside en la indistinguibilidad de dos neutrones, sino en la identidad continua de cualquier neutrón *consigo mismo* en el curso del tiempo y a través del espacio. En conclusión, un solo neutrón mantiene su identicidad.

Esta idea no carece de sutileza. Podemos referirnos a un neutrón que se halla en la habitación A, en cuanto diferente de otro que se encuentra en la habitación B. Ahora bien, mirado con profundidad, no estamos distinguiendo realmente entre los neutrones, sino sólo entre las *habitaciones* donde están. Si escapasen de su confinamiento, no se podría ya distinguir uno de otro.

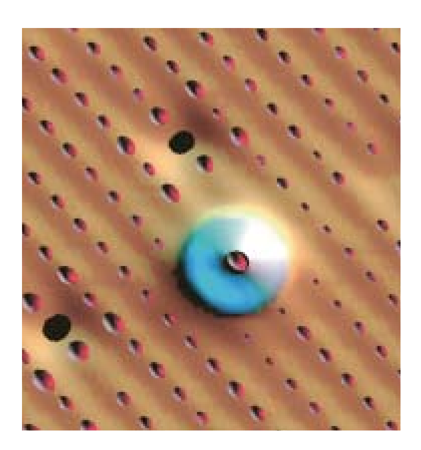
Esto se aplica de manera inmediata a las imágenes que Hans Dehmeltm de la Universidad de Washington, obtuvo en 1980, de un átomo. Aparecía ingeniosamente suspendido en una trampa y aislado de otros. En las imágenes se ve, es cierto, un átomo solitario. Sus parpadeos constituyen una manifestación directa de los saltos cuánticos que suceden cuando el átomo absorbe luz, queda excitado y radia ese exceso de energía. Un tal átomo puede seguir atrapado durante meses. A quienes lo guardaron así, se les hizo tan cercano, que hasta le pusieron nombre (“Astrid”). Sin embargo, permanecerá silvestre y sin individualidad, por mucho tiempo que se dedique a domesticarlo. En cuanto se liberara a “Astrid”, no habría manera de atraparlo de nuevo. El nombre es humano, el átomo no tiene nombre.

El éxito de Dehmelt se cimentó sobre su anterior investigación, en la que atrapó un solo electrón. Estuvo confinado 10 meses, pero finalmente se perdió; se convirtió en un electrón sin rostro entre la muchedumbre. Ese anonimato no se evita haciendo aún menor la trampa. Cuanto más pequeña sea la caja, mayores serán las fuerzas necesarias para confinarlo, y más irregularmente y más deprisa se moverá, como si no quisiera hallarse aislado. Esta manera antropomorfa de hablar no es correcta, pero da una idea viva e intuitiva del principio de incertidumbre de Heisenberg: cuanto más se acote una partícula en el espacio, más incierto devendrá su momento. La caja está construida por electrones idénticos al electrón prisionero; a medida que empequeñezca, cada vez habrá más razón para afirmar que el prisionero ha cambiado su puesto con uno de los guardianes.

El problema de Einstein

En esa posibilidad de intercambio reside la causa de que no podamos considerar un átomo o un neutrón como algo separado de sus hermanos. Sucede lo mismo que con los gemelos, que confunden al profesor cambiándose de pupitre. La metáfora, empero, no es exacta; los gemelos no son tan idénticos como los átomos.

La confusión de la identidad conduce a unos efectos cuánticos especiales. Nos referimos a las fantasmales correlaciones que Einstein encontraba tan paradójicas, como si fueran diabluras de gemelos. Insistía en que la física debe dar "una completa descripción de los sistemas individuales", de manera que se pueda "seguir el curso de los átomos individuales y predecir sus acciones". Pero esta capacidad requeriría la identificación de cada partícula con un individuo único, lo que es imposible.



6. IMAGEN DE UN SOLO ATOMO de xenón, tomada con un microscopio de barrido de efecto túnel. Induce a error al sugerir que un determinado átomo puede tener características que le conviertan en especial. Este es idéntico en todo a los demás átomos de xenón.

CORTESIA DE DON EIGLER, IBM ALMADEN RESEARCH

Las objeciones de Einstein arrancaban de su concepción de las leyes de la física. Para él, como antes para Newton, determinaban de manera cabal el devenir de cada partícula individual. Pero la identicidad obliga a ir más allá de la descripción newtoniana de las partículas identificables, cada una con una posición y una velocidad observables y regidas por una ecuación matemática. Esa exigencia le llevó a Max Born a una formulación, profundamente novedosa en su expresión matemática, de la teoría cuántica. Sucedió en 1928.

A fin de ocultar la individualidad, Born atribuyó al mundo dos niveles: un nivel exterior de números positivos, que representaban la probabilidad de observar un neutrón en un lugar del espacio-tiempo, y un nivel interior, no accesible a la observación, que guiaba las probabilidades observables. En el nivel interior estaban las *amplitudes*, números complejos (entes relacionados con la raíz cuadrada de los números negativos); no se las puede observar debido a que los dispositivos de medición registran sólo números reales. Born estipuló que esas amplitudes siguen ecuaciones estrictas (la de Schrödinger o la de Dirac), que determinan su despliegue en el tiempo, sin incertidumbre.

Ahora bien, las probabilidades que se observan son el cuadrado de una magnitud real ligada a las amplitudes. Estas probabilidades no evolucionan de manera determinada. Así, la probabilidad de que se observe un neutrón en un instante y en un lugar no determina, en absoluto, la probabilidad de que se lo pueda observar en otro tiempo y lugar, ya que ello significaría identificar la partícula. Por consiguiente, no hay una ecuación maestra que prediga con certeza las apariciones del neutrón. Y ello, pese a que existe una ecuación que predice la probabilidad de que se pueda observar el neutrón aquí o allá.

Certezas cuánticas

Las matemáticas proporcionan sólo una representación de la realidad física, pero permiten profundizar en su naturaleza y disipan malos entendidos. Por ejemplo, la teoría cuántica no versa, en última instancia, sobre la incertidumbre y el indeterminismo. En el nivel interno, es tan cierta y determinada como las teorías de Newton y de Maxwell. La aparente incertidumbre sólo emerge cuando intentamos observar, desde el exterior, lo internamente determinado. Pero estamos formados por un número inmenso de electrones y quarks (los constituyentes de los protones y los neutrones), cuyo estado puede ser de una inmensa complejidad. "Somos", en el sentido correspondiente a nuestra aparente individualidad global, esos estados complejos, que caracterizan nuestras aproximaciones a la realidad. Cuando queremos examinar un átomo en concreto, lo hacemos con instrumentos que son, en comparación, enormes. Ello es coherente con nuestro tamaño y nuestra roma sensibilidad. Además, observamos sólo sucesos probabilísticos. Pero nuestra mente puede adentrarse en el reino de certezas a través de las ecuaciones de la teoría.

Esta doble visión del mundo es turbadora. Según juzgaba Einstein, la mecánica cuántica había abandonado el proyecto central de la física: la comprensión cabal de los datos observables mediante una teoría matemática. No aceptaba el punto de vista de Born: que lo observable no es seguro y lo seguro no es observable. Ciertamente, Einstein reconocía la potencia y la validez de la teoría cuántica, pero no la consideraba completa. Su concepción del entender urgía trascender esos aparentes límites del conocimiento. Pensaba que cada neutrón tenía su propia individualidad, acerca de la que nosotros andamos confundidos, pero que Dios conoce perfectamente bien. Ningún observador, sin embargo, puede distinguir un neutrón de otro.

Bibliografía complementaria

INDIVIDUALITY: AN ESSAY ON THE FOUNDATIONS OF METAPHYSICS. J. J. E. Gracia. State University of New York Press; Albany, 1988.

THE PRINCIPLE OF IDENTICALITY AND THE FOUNDATIONS OF QUANTUM THEORY. I: THE GIBBS PARADOX. II: THE ROLE OF IDENTICALITY IN THE FORMATION OF QUANTUM THEORY. P. D. Pesic, en *American Journal of Physics*, vol. 59, págs. 971-979; 1991.

IDENTITY AND THE FOUNDATIONS OF QUANTUM THEORY. P. D. Pesic, en *Foundations of Physics Letters*, vol. 13, págs. 55-67; 2000.

CURIOSIDADES DE LA FÍSICA

Jean-Michel Courty y Edouard Kierlik

300 estrellas de artificio

Hace exactamente dos años Investigación y Ciencia cumplía su vigésimo quinto aniversario: ¡trescientos números de la revista! Dos amigos de la misma, el profesor Almud y el doctor Celemín, nos propusieron que lo festejáramos escribiendo un "300" en el cielo con caracteres de fuego. Ya se encargarían ellos de todo. Se pusieron manos a la obra. Lo primero era estudiar cómo se podrían propulsar unos ingenios de artificio que dibujaran tan arriba las cifras 3 0 0. Pero, ay, las cosas no les resultaron tan fáciles; no les quedó más remedio que reconocer al final que la pirotecnia es un arte sutil, que conviene dejar a los expertos. Eso sí, algo sacaron en limpio: se sienten felices por haber descubierto cómo se las ingenian los pirotécnicos con la combustión. Sigamos a nuestros dos amigos para enterarnos también nosotros.

La propulsión

Durante el espectáculo, el pirotécnico envía al cielo numerosas bombas, que en las alturas dispersan una multitud de partículas chispeantes. Almud y Celemín optaron por unas bombas cilíndricas de 15 centímetros de diámetro, cuya carga de un kilogramo, decían, "garantizará el espectáculo". Esos proyectiles hay que mandarlos a 240 metros altura para que sean visibles y el público no corra ningún peligro. Para que lleguen a esa altura, los pirotécnicos se valen de morteros, una suerte de cilindros de cartón grueso de un metro de largo, que plantan verticalmente en el suelo. Cuando la "mezcla" estalla —así es como se llama a la carga propulsora—, el resto de la bomba sale del mortero a gran velocidad. En el caso de las bombas que eligieron nuestros amigos, la velocidad inicial necesaria para alcanzar la altura requerida es de 100 metros por segundo (de no existir rozamientos, bastarían 70 metros por segundo).

¿De qué se compone la mezcla? Desde la China antigua, se hace de "pólvora negra", mezcla sólida de



Los pirotécnicos escriben ya en sus ingenios lo que desean que se escriba luego en el cielo. Este número está hecho de pequeñas bolas de pólvora y sales

75 por ciento de salitre (KNO_3), 15 por ciento de carbón y 10 por ciento de azufre. La combustión de la pólvora se produce sin oxígeno, pues el salitre hace las veces de comburente. La temperatura de 2500 a 3500 grados de los gases liberados la sitúa en la categoría de las "deflagraciones" (combustiones cuya velocidad de llama es mayor que un metro por segundo).

Almud y Celemín pensaron primero en calcular la masa de pólvora necesaria a partir del calor liberado por la combustión química de la pólvora negra. Cada gramo de pólvora produce, al quemarse, 1360 joules en forma de calor. Entonces, si toda la energía de la combustión se transformase en energía cinética, bastarían cuatro gramos de pólvora para producir los joules de energía cinética necesarios. ¿Era verosímil? Nuestros amigos consideraron que cuatro gramos difícilmente propulsarían una bomba de un kilo... Ocurre que se pierde la mayoría de la energía de combustión de la pólvora. ¿Cuál es, pues, la masa necesaria?

Preguntaron a un profesional, quien calculó que no harían falta menos de 200 gramos de pólvora para enviar la bomba a la altura deseada. Una masa así libera 272 kilojoules, o sea, cincuenta veces largas la energía cinética mínima necesaria. Así pues, sólo se emplea un dos por ciento de la energía liberada por la combustión.

¿Cómo se calcula la masa de pólvora necesaria? Almud y Celemín trataron de deducirla a partir del mecanismo de propulsión. La fuerza propulsora resulta de los gases calientes liberados por la combustión. Como en el interior del mortero el volumen está limitado, la generación del gas crea allí una sobrepresión que empuja la bomba hacia arriba. Ese empuje dura mientras la presión en el interior del mortero se mantenga superior a una atmósfera (la presión exterior). Por lo tanto, para que el empuje subsista durante todo el trayecto por el interior del cilindro, debe producirse un volumen de gas al menos igual al del tubo. Ahora bien, a la presión atmosférica, el volumen de gas caliente liberado por la combustión de un gramo de pólvora es del orden de un tercio de litro. El volumen del mortero es de unos 17 litros. Almud y Celemín concluyeron que al menos hacía falta 60 gramos de pólvora para acelerar la bomba durante un metro.

Su razonamiento era correcto, pero les faltaba una información, les dijo el experto: los pirotécnicos dejan siempre un huelgo de un centímetro entre la periferia de la bomba y el diámetro interior del mortero. Proceden así para evitar accidentes, que la bomba se atasque en el tubo, por ejemplo; además, el mortero sufre menos. En tales condiciones, las pérdidas de gas y, por tanto, de energía, son enormes. Al contar con más espacio los gases generados por la deflagración, su presión aumenta mucho menos. Para compensar hay que producir más gas. Al final, se nece-

BRUNO VACARO

sitan no menos de 200 gramos de pólvora.

La "práctica", les confió asimismo el pirotécnico, guarda otros muchos "detalles esenciales". Para preservar el cartón del mortero, hay que evitar también una presión demasiado alta en el tubo. Durante la deflagración, la presión en un mortero de pirotécnico sube hasta cinco atmósferas, pero no debe rebasar ese valor. Para limitarla, lo ideal es "escalonar" la combustión de la mezcla a lo largo de toda la duración de la propulsión. De ese modo se minimiza la cantidad de gas que ha de producirse al principio del trayecto, cuando el volumen disponible es reducido porque la carga está en el fondo del mortero.

Composición de la pólvora

Los pirotécnicos efectúan ese ajuste jugando con la composición de la pólvora y su granulosidad. La combustión se produce en la superficie de los granos de pólvora. Resulta tanto más rápida e intensa, pues, cuanto mayor es esa superficie, es decir, cuanto más finos son los granos. Los cazadores de antaño, que se fabricaban ellos mismos la munición, sabían eso muy bien. Según la naturaleza de la bala, empleaban pólvoras de granulosidades diferentes. Al infeliz que usase una pólvora fina con un proyectil pesado, la combustión demasiado rápida en un volumen reducido por la inercia de la bala podía provocarle el estallido del cañón.

Otro detalle práctico: debe encenderse la carga cuando la bomba llega a su apogeo, tres segundos y medio después de la salida. Los pirotécnicos ceban la carga a la vez que encienden la mezcla. El cebo es un cilindro de pólvora comprimida, que se quema lentamente; el efecto es el mismo de una mecha de petardo. Se elige la longitud adecuada para que la carga se encienda a la altura debida.

Estos "detalles" resuelven el problema balístico. Queda la carga, cuya naturaleza tuvo el pirotécnico a bien explicar. Consta de un conjunto de pequeñas esferas de algunos milímetros de diámetro, dispersas en el seno de una carga de pólvora negra. Sus colores, expuso, dependen de la composición química. Para el verde, se emplean sales de bario; las sales de estroncio son para el azul y las de cobre, para el rojo.

Cuando la mecha de retardo inicia la pólvora de la carga, ésta deflagra, lo que inflama las esferas que contiene: las "estrellas". Esta vez, la deflagración tiene lugar en un recinto reducido, dentro de la carcasa de la bomba. Los gases producidos hacen estallar la carcasa y, al dilatarse en el aire, arrastran consigo las estrellas. La explosión final provoca una dispersión del conjunto que conserva la disposición relativa de las estrellas.

Nuestros amigos comprendieron entonces que había que aprovechar esa propiedad para dibujar el 300 en el cielo. Confirmando esa deducción, el pirotécnico les explicó que se emplean dos tipos de bombas, uno oriental, otro occidental. En Oriente, las bombas son esféricas y las estrellas se disponen en capas concéntricas. De ahí que formen en el cielo esferas concéntricas, cuyo radio aumenta durante la explosión (*véase la fotografía*). Entremezclando esferas activas e inactivas (se requiere su presencia para que la bomba no se desequilibre), los pirotécnicos orientales crean formas espaciales. Con su dominio de los colores artificiales, los japoneses emplean tan diestramente la mezcla de estrellas activas e inactivas, que consiguen dibujar en el cielo formas sencillas, como un corazón o una mariposa.



En Occidente, los pirotécnicos emplean bombas cilíndricas, que la mayoría de las veces lanzan las estrellas a bulto, de modo que se producen surtidores coloreados, irregulares. Sin embargo, les es asimismo posible disponer las estrellas para que formen figuras. La cifra "3" por ejemplo, así como las cifras "0" y "0" pueden conformarse a partir de las estrellas. Dentro de la bomba, esas cifras miden sólo algunos centímetros, pero se extienden hasta medir decenas de metros tras la explosión de la carga.

Orientación de las bombas

Almud y Celemín creían que, por fin, sabían todo lo que había que saber, pero su interlocutor les guardaba un último "detalle esencial", de índole "práctica". Todavía faltaba orientar correctamente la bomba durante el lanzamiento, de suerte que el 3, por ejemplo, se escribiese "de pie" y cara al público. El experto les explicó entonces que su colega Lacroix-Ruggieri resolvió el problema de escribir 2000 en el cielo con ocasión de las fiestas del milenario. Aquel día se emplearon cuatro "bombas numéricas". Para aumentar la estabilidad, los hombres de Lacroix-Ruggieri desplazaron hacia arriba los centros de gravedad. Así, las bombas se comportaron como flechas lanzadas verticalmente. No obstante, para estabilizarlas aún más, el pirotécnico las puso también a rotar durante el tiro. La velocidad de rotación la había medido en el transcurso de los ensayos. Jugando con la mezcla y el cebo, ajustó finalmente la duración de los vuelos para que las explosiones tuvieran lugar a la vez y con la orientación conveniente. Aquel día, eligió como estrellas partículas de titanio de 500 micras de diámetro, que, al quemarse en el aire, escribieron la cifra 2000 con un bello trazo brillante en el cielo de París.

¡Cuántos "detalles esenciales" nuevos había que dominar! El profesor Almud y el doctor Celemín aún están asombrados, pero no desanimados. Decidido está que, en 2026, cuando la revista llegue al número 600, ya habrán efectuado todos los cálculos y realizado todas las medidas necesarias para escribir con letras de fuego *Investigación y Ciencia* en el cielo.

LACROIX/RUGGIERI

Juan M.R. Parrondo

El problema del secador de manos

Hace poco visité el nuevo bar de mi amigo Andrés. Después de lavarme las manos en el servicio del bar, pulsé el botón del secador, uno de esos que funciona con aire caliente y disponen de un temporizador. Como quizá le haya ocurrido al lector más de una vez, el aparato se detuvo cuando tenía las manos aún húmedas. Incómodo, volví a ponerlo en marcha, las manos se secaron mucho antes de que el temporizador detuviera el secador por segunda vez y al salir continué oyendo el zumbido machacón del motor durante un buen rato desde la barra.

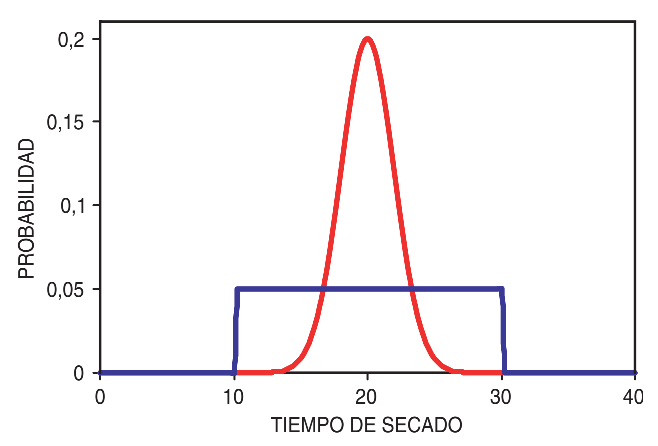
Atormentado desde hace años por esta asincronía entre los secadores y mi capacidad de frotar las manos, le grité a Andrés, mientras se seguía escuchando el murmullo del aparato a través de la puerta del servicio:

— ¿Por qué programan estos cacharros para que funcionen durante un intervalo de tiempo tan corto? Es molesto tener que volver a pulsar el botón con las manos aún húmedas, pero aún más ver cómo se derrocha energía eléctrica con el secador funcionando la mitad del tiempo para nada.

Andrés contestó sin dejar de dar brillo a las copas, como si hubiese tenido la misma conversación una decena de veces:

— No todo el mundo tarda lo mismo que tú. Hay quienes lo ponen en marcha cuando ya casi están abriendo la puerta para volver al bar. Y otros parece que hacen la colada allí mismo, del tiempo que se pasan debajo del aire caliente. Supongo que el fabricante del secador habrá tomado una especie de media. Piensa también que cuanto más corto sea el intervalo de tiempo, menos energía se derrochará.

— Veo por dónde vas. Si el intervalo fuese de un segundo, por ejemplo, en realidad no se podría nunca derrochar más energía que la gastada en un segundo.



1. Distribuciones del tiempo que necesitan los usuarios para secarse completamente las manos: uniforme (en azul) *y campana de Gauss* (en rojo)

Pero un secador programado así sería una auténtica pesadilla, tendríamos que estar pulsando constantemente el botón de arranque.

Al día siguiente volví a visitar el bar de Andrés armado con toda clase de gráficas y análisis que había realizado la noche anterior. Mi idea era encontrar la duración que debe programarse en el secador para que se derroche la mínima cantidad de energía. Como bien intuía Andrés, la solución sería siempre que el intervalo fuera lo más pequeño posible, a no ser que se tenga en cuenta que al pulsar el botón también existe una cierta pérdida de energía o, si se quiere, un desgaste en la maquinaria del aparato. Decidí que esta pérdida fuera de 0,1 céntimos de euro por pulsación. También es necesario hacer alguna suposición sobre el tiempo que tarda la gente en secarse las manos. He considerado varias posibilidades: que todos tarden lo mismo, 20 segundos, que los tiempos se distribuyan de modo uniforme entre 10 y 30 segundos, o que lo hagan siguiendo una campana de Gauss, también alrededor de 20 segundos. En todos los casos, el valor medio del tiempo es de 20 segundos. Estas dos últimas distribuciones se muestran en la figura 1. Finalmente, supondré que mantener el aparato encendido 20 segundos cuesta un 1 céntimo de euro, es decir, cada segundo nos cuesta 1/20 céntimos. Por tanto, si el secador está programado con una duración de d segundos, el gasto total cada vez que se conecta será de $0{,}1 + d/20$ céntimos de euro, 0,1 por la pulsación y $d/20$ por el funcionamiento durante d segundos.

Con todas estas suposiciones, necesarias para completar el modelo, se puede calcular el gasto total medio de cada persona que utiliza el secador en función de la duración de funcionamiento programada. El cálculo no es demasiado complicado, al menos para el caso en el que todos los usuarios tardan 20 segundos en secarse. Si un individuo tarda un tiempo T en secarse y la duración programada es d, entonces pulsará el botón un número de veces dado por la fórmula:

$$\mathrm{PE}\ (T/\mathrm{d})$$

en donde PE significa aquí “parte entera del número que está entre paréntesis”, es decir, el número entero que queda si eliminamos todos los decimales que van detrás de la coma (por ejemplo, la parte entera de 2,43 es 2). El gasto para esta persona es entonces:

$$(0{,}1 + d/20) \times \mathrm{PE}\ (T/\ \mathrm{d})$$

Calcular el gasto en el caso en que todos los individuos se secan las manos en 20 segundos es muy sencillo: basta hacer $T = 20$ en la fórmula anterior. El resultado es la curva verde de la figura 2. Como vemos, la duración óptima es evidentemente $d = 20$ se-

gundos, ya que entonces a todos los usuarios les basta una pulsación para secarse. En los casos en los que hay una distribución de tiempos, como las dadas en la figura 1, es necesario promediar la fórmula anterior utilizando la distribución correspondiente. El cálculo es bastante más difícil y hay que hacerlo con ordenador. La curva roja muestra el resultado para la campana de Gauss y la azul el correspondiente a la distribución uniforme. ¿Cuál es finalmente la duración óptima? Depende mucho de la distribución. De hecho, es sorprendente que la dependencia sea tan acusada. Por ejemplo, en el caso de la campana de Gauss, la duración óptima es de 23,5 segundos, con un gasto medio aproximado de 1,225 céntimos de euro por secado. Pero esa misma duración produciría un gasto de 1,59 céntimos si la distribución fuese uniforme.

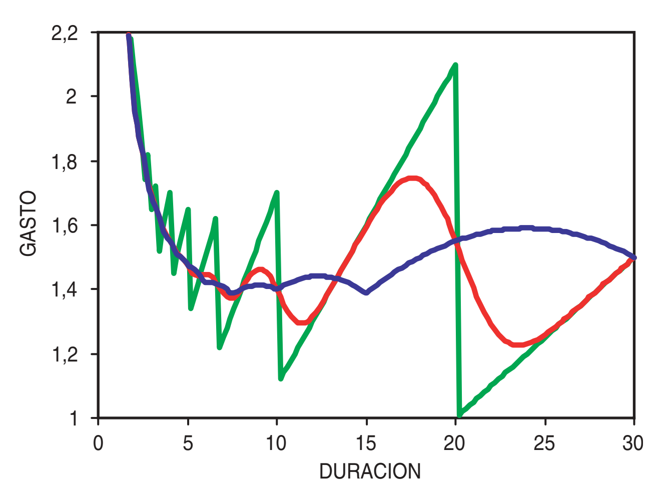
Un poco desanimado por estos resultados, pero con la obstinación típica del científico, le dije a Andrés:

— Lo mejor que podemos hacer es apostarnos durante varios días en la puerta del servicio y medir cuánto tarda cada cliente en secarse. Así tendríamos la distribución real, podríamos calcular la duración óptima y programarla en el secador.

Mi amigo Andrés, que no es muy experto en matemáticas, pero tiene la sabiduría de un buen barman, respondió con tranquilidad sin dejar de sacar brillo a las copas:

— Todo esto está muy bien, pero me parece que no va a sernos muy útil. Lo más probable es que eso que llamas distribución de tiempos *dependa* de la propia duración del secador. Si a un tipo se le para el secador con las manos ligeramente húmedas, quizá maldiga al fabricante, pero lo más probable es que no lo conecte de nuevo y se vaya a su mesa sacudiéndolas para que acaben de secarse.

Definitivamente, me di por vencido. Lo que Andrés intuye es un caso de retroalimentación y un problema de ese tipo es bastante más difícil de resolver. Desde entonces no he vuelto a pulsar dos veces el botón del secador en el bar de mi amigo y salgo siempre sacudiendo las manos al aire.



2. Gasto medio por individuo que utiliza el secador, en función de la duración con la que está programado. La curva verde corresponde al caso en que todos los individuos necesitan exactamente 20 segundos para secarse, la azul corresponde a la distribución de tiempos uniforme y la roja a la campana de Gauss

Mark Fischetti

MICROSCOPIOS DE BARRIDO ELECTRONICO

Alta definición

La imagen impresiona: un minúsculo insecto, ampliado 10.000 veces, parece un monstruo amenazador. Los microscopios de barrido electrónico agrandan los objetos hasta un millón de veces. Pero si sus imágenes cautivan, es por su nitidez: permiten distinguir en la superficie del objeto rasgos de menos de 100 angstrom. Pueden asimismo revelar de qué elementos atómicos se compone la muestra.

Suelen ir asociados a las imágenes que toman de los microorganismos. Sus aplicaciones, sin embargo, son variadísimas. Con ellos, los ingenieros industriales averiguan por qué fallan los materiales —si un metal se cizalla por fatiga, por corrosión o por esfuerzos de tracción—; los fabricantes de motores de propulsión a chorro analizan las partículas atrapadas en los filtros de lubricante para determinar qué piezas del motor se han desgastado; los médicos deducen de qué modo se está degenerando un hueso o si una bacteria ha atacado un tejido; los forenses disciernen si unos cabellos, unas fibras de tela o los residuos de un disparo hallados en sitios diferentes tienen un mismo origen.

Un microscopio de barrido electrónico ordinario, apto para esas tareas, cuesta entre 150.000 y 300.000 euros. La muestra se seca y cubre con una capa de átomos conductores para que no se forme una carga negativa cuando el haz de electrones de alta energía la explore. Instrumentos más avanzados, como los microscopios electrónicos de baja presión o los de entorno, toman imágenes de muestras sin recubrir o húmedas, pero su precio, con todos los accesorios, se acerca al millón de euros. Uno de estos modelos, Qanta, de FEI, fabricante de Hillsboro (Oregón), permite al usuario humedecer, calentar, alargar o comprimir la muestra.

Los microscopios de barrido electrónico no sólo prestan grandes servicios en cuestiones prácticas. Los ilustradores ya los emplean para representar objetos comunes y no tan comunes; colorean las imágenes, en blanco y negro de por sí, para realzar su atractivo. Puede que fotogramas de células epidérmicas, mohos o minerales no tarden en aparecer en libros y paredes de museos junto a las fotografías y pinturas de los ilustradores tradicionales.



KENT SNODGRASS *Precision Graphics*; MICROANGELA/TINA CARVALHO *Biological EM Facility, Universidad de Hawai (pelo de araña y hormiga negra)*

1. EL OBJETO A OBSERVAR se seca y cubre con átomos conductores, de oro por lo normal, que atraen un haz de electrones. Este interactúa con la nube de electrones de la muestra. Desprende de ella electrones de baja energía. Un detector de electrones secundarios cargado atrae inmediatamente todos los electrones de baja energía hacia el interior de su tubo, millones de veces por segundo. Cada captura corresponde a un píxel en la superficie del objeto. Un multiplicador en cascada amplifica los electrones, que un ordenador lee como corriente eléctrica. O bien, se determinan los elementos de una muestra desplazando bajo la lente el detector de retrodispersión. El haz atraviesa un orificio y la muestra. Diferentes núcleos atómicos desvían en grados distintos las trayectorias de los electrones; algunos incidirán en la cara inferior del detector, donde dejarán una rúbrica característica.

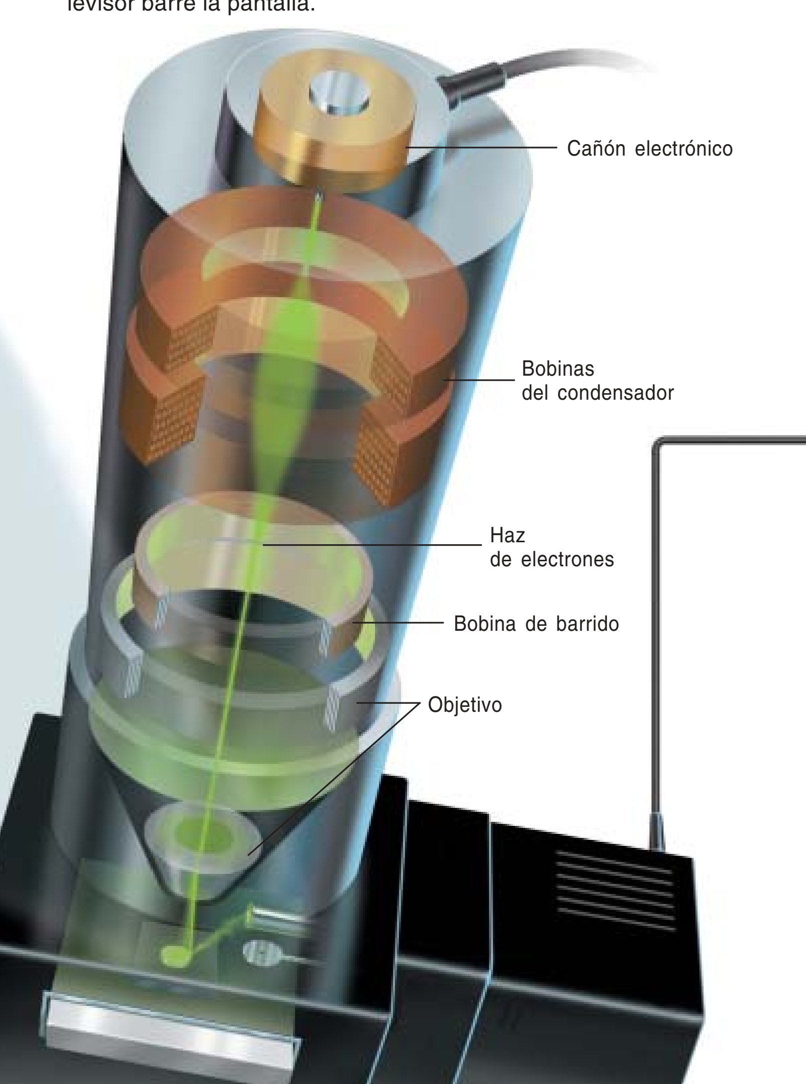
¿SABIA USTED QUE...?

➤ **POR DENTRO, NO POR ENCIMA**: Más que batir la superficie de un objeto con los electrones para revelar su topografía, los microscopios de transmisión electrónica hacen que los electrones lo atraviesen para desvelar sus entrañas. La resolución de esos microscopios puede llegar hasta un angstrom. La dificultad estriba en que hay que preparar la muestra como corte de material de 1000 angstrom de espesor. Así, aunque el instrumento no pueda mostrar la imagen ampliada de un mosquito, sí descubrirá un virus escondido en una célula del insecto.

➤ **K-12**: Los colegios de primera y segunda enseñanza estadounidenses pueden valerse de la Red para usar el microscopio de barrido electrónico de la Universidad estatal de Iowa. Dentro del programa Excel (www.mse.iastate.edu/excel), financiado por la Fundación Nacional de Ciencias, el departamento de ciencia e ingeniería de materiales prepara la muestra enviada por una clase y la coloca en un microscopio de barrido electrónico. En un momento acordado previamente, la clase se conecta a la Red, maneja el instrumento y observa la imagen. Los alumnos pueden mover la muestra, modificar la ampliación, el enfoque, el contraste y la luminosidad, y obtener datos acerca de la composición química. Entre los objetos preferidos se cuentan papeles, minas de lápiz, azúcar, hojas vegetales, insectos, tierras y dulces.

➤ **MICROCHORREADORAS DE ARENA**: Las máquinas de haz iónico concentrado funcionan del mismo modo que los microscopios de barrido electrónico, pero la muestra la baten con un haz de iones, de galio por ejemplo. Crean imágenes superficiales, pero también arrancan material al modo de una chorreadora de arena. Se emplean para descubrir y reparar defectos en los circuitos integrados y para tallar otras microestructuras.

2. UN CAÑON ELECTRONICO emite el haz de electrones. Bobinas condensadoras coliman y estrechan el haz; un objetivo lo enfoca con precisión. Las bobinas de barrido crean un campo magnético variable que arrastra al haz sobre la muestra para que la explore; remeda así la forma en que el haz de un televisor barre la pantalla.

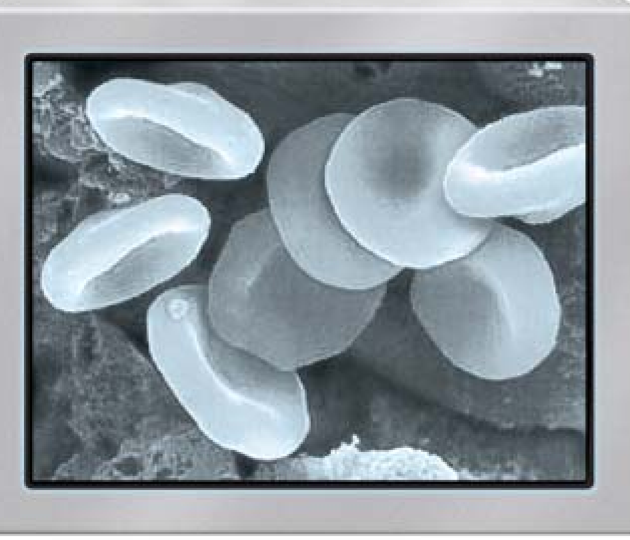




Pelo de araña



Hormiga negra



Células sanguíneas

3. EL ORDENADOR TRANSFORMA la señal, variable de píxel a píxel, del barrido de una superficie en la correspondiente imagen visible sobre un tubo de rayos catódicos. Los puntos elevados de la muestra aparecen blancos en la pantalla; los bajos, oscuros. Los puntos inclinados hacia el detector se ven un poco más brillantes; los inclinados en sentido contrario, algo más apagados. Eso lo interpreta el cerebro humano como claros y oscuros, tal y como interpreta las luces y las sombras bajo la luz solar.

LIBROS

Tectónica de placas

Una teoría global

THE EARTH INSIDE AND OUT: SOME MAJOR CONTRIBUTIONS TO GEOLOGY IN THE TWENTIETH CENTURY. Dirigido por David R. Oldroyd. Geological Society; Londres, 2002.
MILESTONES IN GEOSCIENCES. SELECTED BENCHMARK PAPERS PUBLISHED IN THE JOURNAL *GEOLOGISCHE RUNDSCHAU*. Edición preparada por Wolf-Christian Dullo et alii. Springer; Berlín, 2003.

PLATE TECTONICS. A INSIDER'S HISTORY OF THE MODERN THEORY OF THE EARTH. Dirigido por Naomi Oreskes. Westview Press; Boulder, 2003.

THE DYNAMIC STRUCTURE OF THE DEEP EARTH. AN INTERDISCIPLINARY APPROACH, por Shun-ichiro Karato. Princeton University Press; Princeton, 2003.

Razona David Oldroyd, geólogo y reputado historiador de su disciplina, que carecemos todavía de suficientes monografías analíticas para poder esbozar la síntesis de la geología del siglo XX, al modo en que Zittel describiera su desarrollo en el XIX. Con el fin de paliar tal deficiencia ha cohesionado los capítulos de un primer intento en esa dirección *The Earth Inside and Out: Some Major Contributions to Geology in the Twentieth Century*. Complételos el lector con artículos seminales de los escalonados progresos de las ciencias de la Tierra en la centuria recién clausurada, agavillados en *Milestones in Geosciences*. Ambos libros se complementan, además, en su perspectiva académico-geográfica. Predomina en el primero la labor de ingleses y norteamericanos; de alemanes en el segundo. Y puesto que la idea central gira en torno a la tectónica de placas, podrán repasarse con provechosa delectación las páginas que los protagonistas de dicha tesis movilista han redactado para *Plate Tectonics. A Insider's History of the Modern Theory of the Earth*. Una tesis que se cuenta entre las grandes revoluciones recientes y que, por tanto, ha obligado a reescribir los libros de texto (*The Dynamic Structure of the Deep Earth. An Interdisciplinary Approach*).

Desde el siglo XVI los cartógrafos habían dado cuenta del carácter encajante de los bordes continentales. Trescientos años después, los paleontólogos desenterraban plantas y animales fósiles que, pese a haber aparecido en lugares muy alejados entre sí, guardaban sorprendente parentesco. Semejanzas que se advertían también en algunas secuencias de las formaciones de rocas en continentes distantes. Para explicar tales afinidades, Eduard Suess proponía, al alborear el siglo XX, la hipótesis de Gondwana, un supercontinente que debió de cubrir buena parte de la superficie terrestre antes de fraccionarse. No pasaron muchos años hasta que Alfred Wegener sugiriera una propuesta alternativa, la deriva continental. Las coincidencias paleontológicas y el encaje del rompecabezas zigzagueante cobraban coherencia si se admitía que los continentes habían migrado, unas veces juntándose, otras separándose. Esa primera formulación de la deriva continental apareció en un ensayo sobre el origen de los continentes, publicado, lo mismo que otros artículos fundamentales de las ciencias de la Tierra, en la revista *Geologische Rundschau*, compendiada en *Milestones*.

Wegener aducía que, durante las eras Paleozoica y Mesozoica (hace entre 300 y 200 millones de años), los continentes se encontraban unidos en un supercontinente que él llamó *Pangea*. En el marco de la deriva continental hallaba sentido el cambio paleoclimático, mediante la distribución móvil de tierra firme y mar, en tanto que los procesos de falla y movimiento de masas de tierra ofrecían el mecanismo responsable de la formación de montañas, volcanes y terremotos. A esa tesis movilista aportaron ejemplos brillantes, en la misma revista, Gustav Steinmann y Alexander du Toit. Pese a tan sólido respaldo, a los empeños teóricos de Arthur Holmes (que enraizaba la deriva en la convección del interior de la Tierra) y a los datos gravimétricos suboceánicos recogidos por Felix Vening Meisnez, entre otros muchos argumentos paleontológicos, estratigráficos y geofísicos más, la deriva continental no fue aceptada por la mayoría.

Encontró particular resistencia en la Unión Soviética y en los Estados Unidos. Las ideas de Wegener no se difundieron en la antigua URSS hasta la versión al ruso de su *Entstehung der Kontinente und Ozeane* en 1925. La oposición tenía que ver con el talante conservador de la ciencia oficial soviética (recuérdese el caso de la genética), con su escaso contacto con la ciencia occidental y con su atención preferente a las grandes masas continentales, ignorando los avances de la oceanografía. Bajo la influencia de Michael Tetyayev, la geología soviética se mostraba crítica no sólo contra la deriva continental, sino también contra cualquier modelo que concediera un papel dominante a los movimientos horizontales de la corteza. Tetyayev consideró los movimientos verticales y oscilantes el tipo principal de movimiento tectónico, dejándole una función subsidiaria a los horizontales. Encontró un sólido aliado en su discípulo Vladimir Beloussov. Esta tesis fijista perduró hasta los años sesenta.

La reticencia norteamericana a la propuesta de Wegener se fundaba en otras razones. La geología estadounidense daba por supuesta una profundidad global uniforme. Corteza y manto se hallarían en estado de equilibrio isostático. Los movimientos laterales, en la medida que existieran, se les suponía de microes-

Armas de destrucción masiva

CHEMICAL AND BIOLOGICAL WARFARE. A COMPREHENSIVE SURVEY FOR THE CONCERNED CITIZEN, por Eric Croddy, Clarisa Pérez Armendáriz y John Hart. Springer-Verlag; Nueva York, 2002.

Eric Croddy, investigador asociado del Instituto Monterrey de Estudios Internacionales, se encontraba redactando este libro cuando sucedieron los atentados del 11 de septiembre de 2001. En los meses transcurridos desde entonces, términos como "armas de destrucción masiva", "guerra química y bacteriológica", "ántrax" o "viruela" han tenido una presencia constante en los medios de comunicación y han atemorizado a la población mundial, rara vez bien informada acerca del peligro real que todo ello representaba. Esta obra describe con detalle los agentes químicos y biológicos, repasa la función que han desempeñado a lo largo de la historia y evalúa el riesgo de que sean utilizados en la actualidad.

El libro está dividido en tres partes. En la primera, y a modo de introducción, se relacionan las naciones que poseen armas químicas y biológicas y cómo las consiguen; la segunda parte está dedicada a las armas químicas y la última, a las armas biológicas.

Con rigurosidad exenta de alarmismo, los autores detallan en los primeros capítulos de la obra el modo en que los diferentes países y organizaciones terroristas producen los agentes químicos y biológicos, los almacenan y, finalmente, los difunden. Esta visión de conjunto les lleva a una de las principales aportaciones de este trabajo, una visión realista de la capacidad de destrucción que este tipo de ataques tienen en la actualidad, poniendo en sus justos términos, a partir de los datos recogidos, la amenaza que representan. Se completa este primer apartado con las principales medidas que pueden adoptarse frente a estas armas químicas y biológicas.

La segunda parte del libro recoge una minuciosa descripción de más de cincuenta agentes utilizados en la guerra química, junto con su evolución histórica. Termina con un detallado análisis de la Convención de Armas Químicas (1992) y la dificultad de su verificación, tal y como se ha comprobado en la reciente contienda de Irak.

Las armas biológicas se analizan en el tercer apartado según un esquema muy semejante al apartado anterior. Tras describir los agentes biológicos más utilizados y su desarrollo a través de los años, se comenta en profundidad la Convención sobre Armas Biológicas y Toxinas (1972), que ha resultado menos eficaz que su homóloga sobre armas químicas, problema que los autores analizan con detalle. El último capítulo está dedicado a las diferentes vacunas que pueden emplearse como profilaxis ante determinados microorganismos. Como afirman los autores, las exigencias de la guerra bacteriológica han determinado el desarrollo de las antitoxinas y vacunas modernas para adultos. En este momento se dispone de protección eficaz frente a la fiebre tifoidea, la fiebre amarilla, la viruela, la rabia, el ántrax o el tétanos, entre otras infecciones.

Obra de interés por su actualidad, proporciona información de primera mano, rigurosa y accesible a la vez, sobre las armas químicas y biológicas, a las que sitúa en el contexto adecuado.

—MARÍA JOSÉ BÁGUENA CERVELLERA

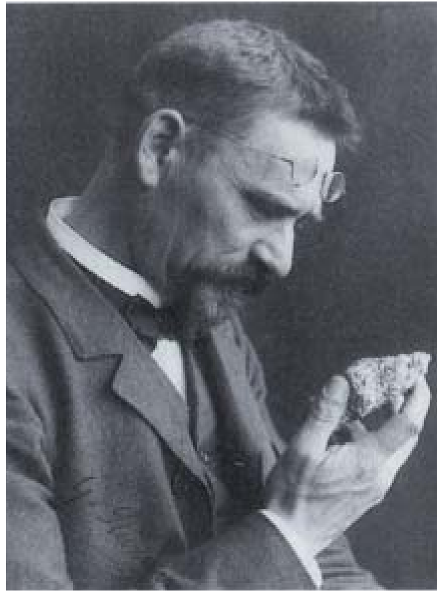
cala y en respuesta a la erosión de montañas y deposición de sedimentos en los océanos. Se partía de una creencia firme en la permanencia de los océanos y los cratones continentales. Reinaba un confeso escepticismo ante los grandes sistemas teóricos, compensado con un celo excesivo por la "colección de datos". La impronta uniformitarista dejada por Charles Lyell llevaba a algunos a afirmar que, de haberse dado cambios latitudinales en la posición de los continentes, no podríamos aplicar al pasado las distribuciones faunísticas actuales; el presente perdía su razón de clave para entender el pasado.

Muy otra será la reacción ante la teoría de las placas tectónicas. Los científicos estadounidenses no dudaron en aceptar la revolución que la misma entrañaba. Hicieron suyos la obra de J. Tuzo Wilson (1965) y el artículo decisivo de Isacks, Oliver y Sykes (1968) en el que se mostraba, mediante pruebas sismológicas, que había movimientos a lo largo de los planos de falla. Paradójicamente la deriva continental, tan postergada, se convirtió en piedra angular de la nueva teoría global. Como Wegener sugería, la rotura de Pangea produjo la configuración de continentes y océanos que tenemos hoy. El movimiento de masas se atribuye ahora a las placas tectónicas, grandes extensiones de la litosfera donde se hallan incrustados los continentes. Las placas, rígidas, no deformables y móviles, comprenden los 80 o 100 kilómetros superiores de litosfera y avanzan a una velocidad de 3 a 10 centímetros por año. Los terremotos, los volcanes y las montañas se concentran en los bordes, allí donde dos placas colisionan, se separan o deslizan una bajo otra.

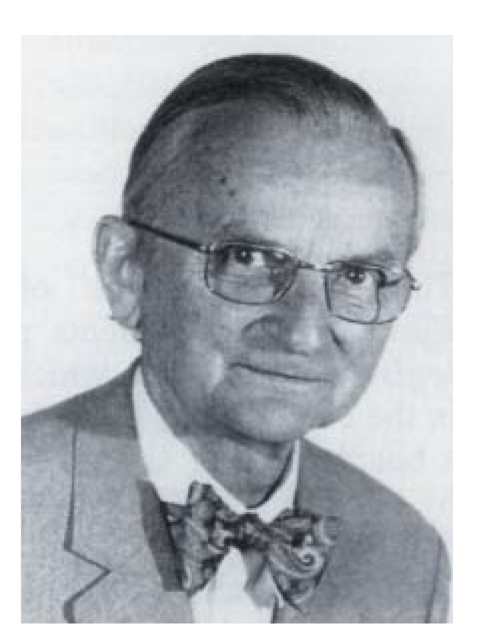
La tectónica de placas es una teoría global, la primera en ser admitida por la mayoría en la historia de las ciencias de la Tierra. Debió su pronta aceptación a su capacidad sintetizadora de datos de diversa naturaleza y tomados de lugares muy distintos. Mientras que Ron Mason y Walter Pitman acometían mediciones paleomagnéticas de rocas del suelo marino, Lawren-



Alfred Wegener



Gustav Steinmann



Wolfgang Schott

ce Morley realizaba mediciones similares en tierra firme, Jack Oliver y Bruce Bolt analizaban datos sísmicos registrados en terremotos y John Sclater medía el flujo de calor sobre las dorsales meso-oceánicas. Si resultó determinante la fusión parcial de dos campos hasta entonces independientes —la geología y la oceanografía—, no fue secundaria la aplicación de nuevos métodos técnicos. (Entre otros, el uso de computadores.) W. C. Krumbein, quien introdujo el computador en geología en 1958, animó el uso del muestreo probabilístico, iniciado en sedimentología por Carl Wilhelm Correns en los años treinta. Continentes y océanos, montañas y valles, volcanes y terremotos encajaban en una tesis movilista de las placas litosféricas.

De acuerdo con sus propias manifestaciones, Harry Hess desarrolló la idea de la expansión del suelo marino —es decir, la formación de nueva corteza oceánica en las dorsales meso-oceánicas, allí donde el lecho se divide y separa, induciendo los movimientos de los continentes— tras reparar en los datos paleomagnéticos recogidos por Keith Runcorn, Ted Irving, P. M. S. Blackett. De tales datos se desprendía que los continentes se movían. La observación del hecho precedió, pues, a la explicación del mecanismo. A finales de los años cincuenta y principios de los sesenta, la Marina estadounidense, preocupada por la detección de submarinos, se interesó en el paleomagnetismo. Arthur Raff, Victor Vacquier y Ron Mason se ocuparon de recoger registros magnéticos de las rocas del suelo marino de la plataforma costera de California, lo que no hubieran podido lograr sin disponer ya de magnetómetros precisos. Mason y Hess descubrieron un patrón característico de "franjas magnéticas": zonas cuya polaridad magnética era la misma que el campo magnético actual, paralelas a zonas cuya polaridad era la inversa.

En el camino hacia la teoría de la tectónica de placas desempeñaron también un papel clave las técnicas analíticas que permitieron interpretar los datos sísmicos. La localización precisa de terremotos y la comprensión de los mecanismos de deslizamiento se convirtieron en cuestiones del máximo interés del gobierno de los Estados Unidos a finales de los años cincuenta y principios de los sesenta, cuando se supo que las pruebas nucleares subterráneas producían ondas sísmicas similares a las de los terremotos, aunque distinguibles en potencia. El foco de un terremoto es el lugar donde comienza la fractura, y la mayoría de los epicentros de terremotos se hallan próximos a la superficie, en los 300-450 kilómetros superiores. Algunos se sitúan, sin embargo, a unos 720 kilómetros —terremotos de profundidad— y ocurren en cadenas montañosas en los límites continentales, por ejemplo, debajo de los Andes americanos, o en las cadenas de arcos de islas en cuencas oceánicas, como las islas Aleutianas.

Todavía en los años cincuenta esos terremotos de profundidad provocaban perplejidad. Se daba por descontado que, a tales profundidades, la tierra era demasiado caliente para justificar los movimientos rígidos producidos. Iniciado el decenio de los sesenta, los sismólogos aceptaban la tesis del canadiense J. H. Hodgson según la cual los movimientos en fallas asociados con terremotos de profundidad eran deslizamientos bruscos, en los que intervenía un bloque de roca que pasaba junto a otro bloque. Con el advenimiento de la tectónica de placas se propuso un movimiento de subsidencia, por el que un bloque se hunde bajo el otro: una falla inversa.

Pero antes llegó el artículo de Tuzo Wilson, publicado en *Nature* en 1965, con el título: "Un nuevo sistema de fallas y su comportamiento en la deriva continental". Si se está produciendo la expansión del lecho marino, argumenta, entonces las zonas de fractura que cortan las dorsales meso-oceánicas podrían ser fallas, a lo largo de las cuales se desplazaran los bloques de corteza. Pero podría tratarse de un tipo de



Phillip H. Kuenen



Richard Lachmann



Gerard de Geer

falla distinto del que se venía considerando. En la introducción Wilson postulaba que las zonas móviles de la Tierra —montañas y volcanes a lo largo de los márgenes continentales, y las magnas depresiones que atraviesan los continentes, como el Rift del Africa oriental— se hallaban conectadas en una red continua de cinturones móviles que dividen la corteza en placas rígidas. Wilson acuñó la expresión de fallas de transformación para describir las articulaciones donde las fallas de cizalladura horizontales terminan en ambos extremos en función de otros accidentes tectónicos, en particular las fallas que desplazan segmentos de dorsal meso-oceánica.

En pleno desarrollo de la teoría se sumaron las ciencias planetarias. Los estudios geomagnéticos, tan importantes en la revolución de la tectónica de placas, se hallan vinculados a investigaciones del Sol, la ionosfera, etc. Las imágenes tomadas por las sondas espaciales nos han permitido cartografiar todos los planetas y satélites rocosos del sistema solar, transformándolos consiguientemente de objetos astronómicos en objetos geológicos. Esta progresión de la geología, de una ciencia centrada en la Tierra a una ciencia de alcance planetario, nos ha aportado un filón informativo sobre las historias evolutivas de otros cuerpos, lo que ha repercutido en mejores aproximaciones de la propia Tierra. Hacia finales del siglo XX una de las revistas punteras de los geólogos era *Earth and Planetary Science Letters*.

Hemos llegado a saber, por ejemplo, que el sistema Tierra-Luna se formó como consecuencia de una colisión entre la Tierra y otro cuerpo celeste. Luego, la Luna fue acreciendo, en buena medida, merced a los escombros del manto terrestre. La Luna, sin aire y sin agua, conserva todavía registros de episodios de impacto que han rasgado su superficie desde el tiempo en que se formó su corteza. Por su parte, la Tierra, volcánica y mucho mayor, experimentó un bombardeo similar, pero la mayoría de las señales se borraron en el curso de los primeros 550 millones de años transcurridos antes de que sus primeros sistemas supervivientes de rocas corticales se formaran. Desciframos, pues, la historia primitiva de la Tierra mediante la investigación de su registro en la Luna.

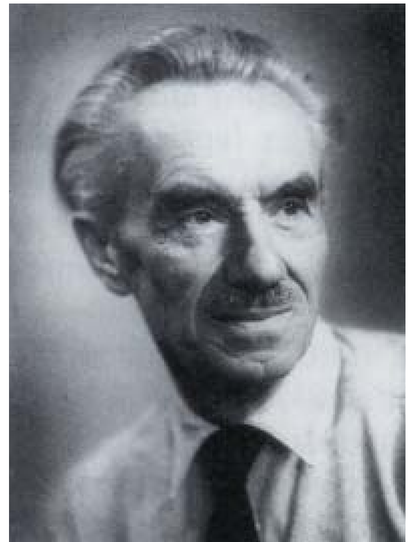
¿Cómo se recibió en la URSS la teoría de la tectónica? Desde principios de los sesenta se había ido abriendo paso una tendencia hacia la observación más atenta de los fenómenos que implicaban desplazamientos horizontales de la corteza, merced al trabajo de Alexander Peive. Impresionado por el papel de las ofiolitas en la estructura de los países balcánicos, Peive publicó en 1969 un artículo titulado “La corteza oceánica del pasado geológico”, punto de inflexión en el estudio de los sistemas de plegamiento de la Unión Soviética. Andando el tiempo, los rusos concentraron sus esfuerzos en problemas no resueltos todavía; uno de ellos, las manifestaciones de la tectónica de placas en el Precámbrico, cuestión muy debatida en los años ochenta.

Pero la tectónica de placas no agota toda la inquisición teórica. En el último cuarto de siglo ha vuelto a aparecer con fuerza la tesis catastrofista. En su nueva presentación, los impactos procedentes de cuerpos extraterrestres (bólidos) habrían ejercido una influencia decisiva en la historia de la Tierra, que se reflejaría en la estratigrafía, paleoclimatología y paleontología evolutiva. Sus proponentes ven una prueba sólida en la extinción de finales del Cretácico que acabó con ammonites y dinosaurios. Para otros, sin embargo, que el famoso episodio de Chicxulub, en la península del Yucatán, fuera responsable de la extinción de los dinosaurios dista mucho de estar clara, pues se han encontrado restos de huevos de dinosaurio (del tipo terópodos ornitoides) por encima del famoso horizonte de iridio. Con otras palabras, el horizonte de iridio no señalaría el término del Cretácico, al menos en la India.

En cualquier caso, la teoría de la tectónica de placas ha obligado a un replanteamiento exhaustivo de la



Marlies y Rolf Teichmüller



Hans Cloos



Carl W. Correns

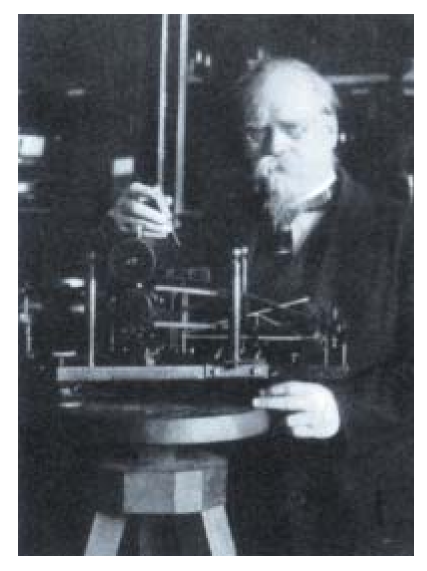
geología, que recogen los manuales, como el de Shunichiro Karato dedicado a la estructura y dinámica del interior profundo (*The Dynamic Structure of the Deep Earth. An Interdisciplinary Approach*). En una exposición diáfana integra la descripción atómica de los materiales componentes del planeta con modelizaciones a gran escala en torno a la dinámica del manto y del núcleo. Para el autor, el interior profundo controla la dinámica de superficie. Una nueva perspectiva a la que se ha llegado merced al progreso en tres frentes: sismología, física de minerales sometidos a altas presiones y modelización numérica.

A través de la sismología, se han descubierto estructuras complejas y procesos dinámicos en el interior profundo de la Tierra. La tomografía sísmica muestra que las placas litosféricas que penetran en el interior del manto encuentran grandes fuerzas de resistencia en el manto medio (zona de transición) y se deforman, lo que a veces va asociado a terremotos de profundidad, para terminar en el manto inferior. La convección del manto comporta una diferenciación química, formando continentes en superficie así como "anti-continentes" en la base del manto. A partir de datos sismológicos podemos inferir el patrón de convección. Pero las interacciones entre las corrientes de convección y las capas del manto profundo pueden entenderse sólo cuando conocemos la naturaleza de los cambios de propiedades en estas regiones asociadas con las transformaciones de fase. Dicho de otro modo, para apreciar la dinámica del interior de la Tierra, tenemos que comprender las propiedades de los materiales de la Tierra.

A través de experimentos de altas presiones y cálculos de mecánica cuántica, se ha demostrado que las propiedades físicas de los materiales del interior difieren de los que se dan en las regiones superficiales. La mayoría de los materiales de la Tierra pueden disolver una gran cantidad de hidrógeno (agua) en el interior del planeta, lo que conduce a una reducción drástica en viscosidad. La cantidad máxima de agua que puede disolverse en los minerales del manto excede con mucho la cantidad de agua del mar. Por razones de densidad, no podemos inferir el componente principal del interior a partir de las rocas de superficie (granito o basalto). Tampoco los sondeos pueden aportar pruebas directas sobre la composición, pues el más hondo, realizado en la península de Kola en Rusia, ha llegado a 12 kilómetros de profundidad, en tanto que el radio terrestre mide 6370 kilómetros. Aunque algunos volcanes arrojan materiales del manto, suelen limitarse hasta 200 kilómetros de profundidad. Por tanto, nuestra inferencia de la estructura interna de la Tierra debe ser indirecta, apoyada en fuentes geoquímicas (distribución de los elementos) y geofísicas (velocidades de las ondas sísmicas y densidad).

La corteza ha experimentado un proceso global de diferenciación química mediante fusión parcial, que se reflejaría en las distintas capas corticales. Cabe suponer, pues, que las porciones más profundas del manto presenten una composición diferente de las rocas de superficie. Dentro de los modelos geoquímicos destaca el petrológico de Ted Ringwood. Se basa en el supuesto de que la formación de basalto, a través de fusión parcial de los materiales del manto, constituye la principal actividad volcánica de la Tierra. Los materiales del manto producirían basalto (con mayor precisión, basaltos de la dorsal meso-oceánica) en un proceso de fusión parcial. Eingwood propuso la existencia de una roca hipotética, la *pirolita*, que generaría basaltos de la dorsal meso-oceánica por fusión parcial; en su modelo, la mayor parte del manto constaría de pirolita. La variación de la densidad con la profundidad del manto y las propiedades elásticas del mismo debían serían resultado de transiciones de fase, compresión y expansión térmica de la pirolita.

Otro modelo geoquímico que ha suscitado interés es el planetario o de las condritas carbonáceas. Asimila la composición química de la Tierra a la media del



Emil Wiechert



Benno Gutenberg

sistema solar. Puesto que el Sol y los planetas surgieron del colapso de una nebulosa primitiva, estarían hechos de los mismos materiales. La composición de la capa externa del Sol puede inferirse del análisis de sus propiedades ópticas. Otra fuente de información sobre la composición del sistema solar procede de la composición de los meteoritos. Entre los diversos tipos de meteoritos, las condritas carbonáceas constituyen un tipo único, integrado por una mezcla de hierro metálico, silicatos y materiales orgánicos. La edad de este tipo de meteoritos, deducida a partir de isótopos radiogénicos, es la mayor (4560 millones de años) de los objetos del sistema solar. Se las considera, por ende, un resto del sistema solar primitivo. La composición química de las condritas carbonáceas coincide con la del Sol, salvo en elementos volátiles. Para los defensores de este modelo, la Tierra tiene una composición similar a la de las condritas carbonáceas.

Todo modelo del interior de la Tierra debe ser coherente también con las observaciones geofísicas, en particular con el momento de inercia y las propiedades de densidad y elasticidad. Si una masa M se encuentra a una distancia R de su eje de rotación, entonces el momento de inercia con respecto a su eje de rotación es MR^2. Para una masa dada, el momento de inercia es grande si la masa se aloja lejos del eje de rotación. Por tanto, el momento de inercia depende de la distribución de masa dentro de un cuerpo; es pequeño si la masa se concentra hacia el centro de un planeta. La densidad media de la Tierra se estima en 5515 kilogramos por metro cúbico. Se trata de un dato importante para hacernos una idea aproximada de su composición; por ejemplo, la densidad de silicatos está entre 2600 y 3400 kg/metro cúbico, y la densidad del hierro (más exactamente la aleación ferroníquel) es de 7800 kg/metro cúbico. A partir de estos valores podemos alcanzar una conclusión importante: que la Tierra consta principalmente de silicatos y de hierro. Las variaciones de densidad por presión y temperatura se hallan entre el 10 y el 20 por ciento, y las diferencias de densidad debidas a las composiciones químicas son mucho más significativas.

En el núcleo metálico, la región más profunda de la Tierra, se genera el campo magnético terrestre. Distinguimos un núcleo externo, líquido, y un núcleo interno, sólido. Aunque el núcleo es una aleación de hierro-níquel, la composición del núcleo interno difiere ligeramente de la composición del externo. La densidad del externo es bastante menor que la densidad del hierro estimado a partir de experimentos de altas presiones. En consecuencia, se considera que el núcleo externo contiene algo de elementos ligeros (azufre, oxígeno, hidrógeno, silicio y carbono), pero el núcleo interno es más próximo al hierro puro. La presencia de una cantidad importante de elementos ligeros en el núcleo externo resulta determinante para comprender la evolución y dinámica del núcleo. Los metales fundidos, hierro incluido, pueden disolver grandes cantidades de impurezas, particularmente a presiones y temperaturas muy altas, pero la solubilidad de las impurezas es mucho menor en los sólidos. El núcleo interno se habría formado por solidificación a partir de un núcleo originalmente fundido en su totalidad.

Ahora podemos entender el campo geomagnético. Dominado por un componente dipolar, varía con cadencia de decenas de años. La variación más palmaria se muestra en la migración gradual del patrón del campo geomagnético hacia el oeste. Puesto que el origen del campo geomagnético se halla en el interior de la Tierra, resulta plausible que se genere por el proceso de dinamo en el núcleo externo; por una doble razón: el hierro no puede tener a la presión y temperatura del núcleo ferromagnetismo como un imán permanente y, además, la escala temporal de la variación del campo es demasiado breve para que se diera si se generara en una porción sólida. Puede admitirse, pues, que el campo magnético se cree por convección en el núcleo externo.

Por mor de simplificación, los primeros estudios de la teoría de la dinamo solían pasar por alto la existencia del núcleo interno. (En un proceso de dinamo, cuando un fluido dotado de alta conductividad eléctrica se mueve sin rumbo, este movimiento distorsiona las líneas del campo magnético y, por tanto, genera un campo magnético. El campo magnético generado ejerce entonces una fuerza sobre el fluido, afectando a su vez a su movimiento.) Desde los años ochenta, sin embargo, se han multiplicado las observaciones sísmicas del núcleo interno. Revelaron que éste no sólo afecta al patrón de convección como esfera sólida, sino que contribuye también a la dinámica del núcleo. Ha quedado demostrado que el núcleo interno posee una gran anisotropía sísmica y que, además, gira más rápido que el manto.

—LUIS ALONSO

AVENTURAS PROBLEMÁTICAS

Dennis E. Shasha

Espías en lo alto

Una agencia de espionaje se ha puesto en contacto con usted para que determine la cantidad de mercancías de contrabando que están pasando de matute entre varios países corruptos. Tras haber sido expedido desde su país de origen, cada contenedor de mercancías es llevado a, por lo menos, un puerto neutral. En el puerto, los contenedores se mezclan con otros en un almacén antes de ser reexpedidos, por lo que no es posible conocer la ruta de cada contenedor individual desde su país de origen hasta el destino final. Ahora bien, unas cámaras instaladas en satélites sí permiten saber el número de contenedores que viajan en cada sentido a lo largo de cada tramo del viaje. Se sabe también que cada contenedor sigue el camino más corto posible hasta su destino.

Como problema preliminar, fijémonos en la ilustración 1 (*arriba*), donde se indica el número de contenedores que viajan desde, y hacia, los países A, B y C, y un puerto neutral situado en el centro. Dado que no se observa movimiento de contenedores desde el puerto neutral hacia el país B, deducimos que los dos contenedores procedentes de C han debido proseguir camino hacia el país A (no pueden retornar a su país de origen). Y como vemos que solamente dos contenedores viajan desde el puerto hasta el país A, los dos contenedores procedentes del país B tienen que haber ido al país C, donde se unieron a los tres contenedores del país A.

Examinemos ahora la ilustración 2 (*debajo*), en la que vemos cinco países y tres puertos neutrales. ¿Podría usted hallar los números máximo y mínimo de contenedores que viajan desde el país A hasta el país D? ¿Y desde A hasta E? La solución varía si el diagrama se modifica como se muestra en la ilustración 3. ¿Cuánto valdrán ahora los números máximo y mínimo?

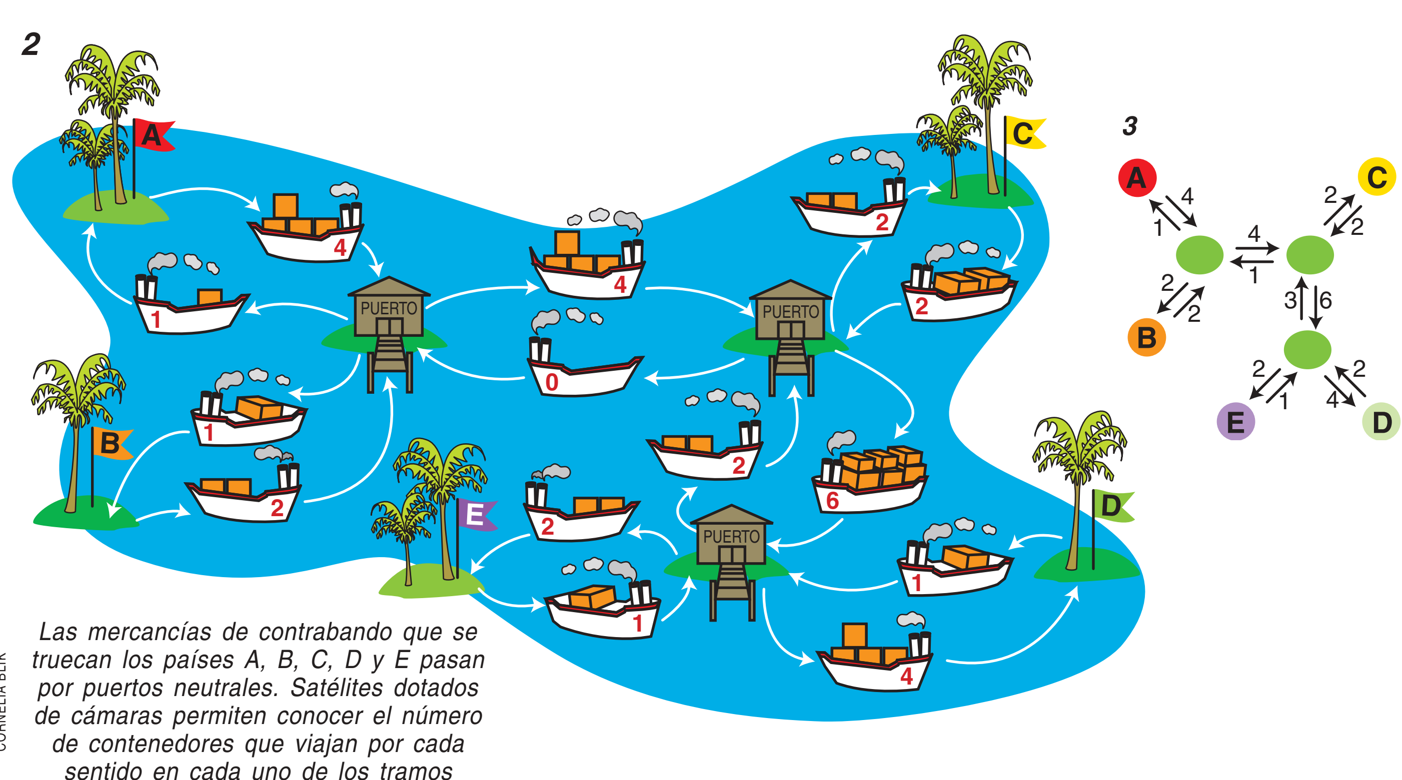
Solución del problema del mes pasado:

Un cuadrado primo omnidextro de orden 3 que solamente utiliza tres dígitos:
311
181
113

Un cuadrado primo de orden 5 que utiliza los diez dígitos:
16451
45389
92893
28069
97171

Solución en la Red

Verán una explicación más completa del problema del mes pasado y la solución del problema de este mes visitando www.investigacionyciencia.es.



Las mercancías de contrabando que se truecan los países A, B, C, D y E pasan por puertos neutrales. Satélites dotados de cámaras permiten conocer el número de contenedores que viajan por cada sentido en cada uno de los tramos

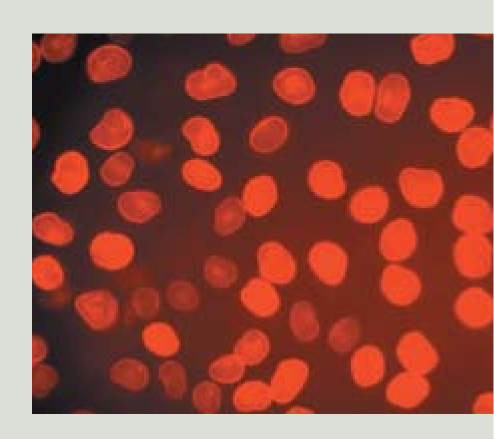
CORNELIA BLIK

EN EL PROXIMO NUMERO... ...DE OCTUBRE 2003



INACTIVADORES DEL GENOMA, por Nelson C. Lau y David P. Bartel

La ciencia acaba de descubrir la existencia de un sistema que bloquea la actividad génica. Se trata de un mecanismo natural que ha despertado el interés de oncólogos y de cuantos investigan las posibilidades de una terapia génica.





INFORMATIZACION Y DESARROLLO DE UN PAIS, por Mark Warschauer

La capacidad de acceso a los recursos digitales no sólo divide a las clases sociales de un país, sino que ahonda también la brecha entre naciones desarrolladas y pobres.

LA FUNCION DEL CEREBELO, por James M. Bower y Lawrence M. Parsons

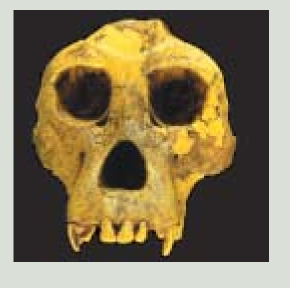
Se ha venido atribuyendo al cerebelo la misión de coordinar los movimientos del cuerpo. De acuerdo con los últimos trabajos, intervendría también en el soporte de actividades cognitivas y perceptivas.

TERMODINAMICA DE LOS AGUJEROS NEGROS, por Jacob D. Bekenstein

La investigación básica sobre agujeros negros ha llegado a la conclusión de que el universo podría constituir un holograma de proporciones gigantescas.

EL ORACULO DE DELFOS, por John R. Hale, Jelle Zeilinga de Boer, Jeffrey P. Chanton y Henry A. Spiller

Los griegos de la antigüedad clásica andaban en lo cierto cuando afirmaban que los vapores procedentes del interior de la Tierra inspiraban las declaraciones proféticas de las sacerdotisas.



PRIMATES DEL MIOCENO, por David R. Begun

En el Mioceno medraron en nuestro planeta un centenar largo de primates. De la cosecha reciente de fósiles se desprende que la evolución que culminó en el hombre no se desarrolló en Africa, sino en Eurasia.

LAS ESTRELLAS BINARIAS, por Teodoro Vives

Al descubrir su verdadera naturaleza, Herschel extendió las leyes de la física más allá del sistema solar. Hoy día son un verdadero laboratorio de astrofísica.

ULUGH BEG, ASTRONOMO Y SOBERANO DE SAMARCANDA, por Bernhard Dumont

Ulugh Beg (1394-1449) fue uno de los astrónomos más famosos de Oriente en el siglo XV. Soberano terrenal, dedicó sin embargo una gran parte de su tiempo al conocimiento del cielo. Para ello hizo construir en Samarcanda, actualmente territorio de Uzbekistán, un gran observatorio astronómico y realizó una competente investigación celeste.

